



TITLE:

弾性材料を使用した浮体係留システムに関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

徳渕, 克正

CITATION:

徳渕, 克正. 弾性材料を使用した浮体係留システムに関する研究. 京都大学, 2007, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2007-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12036>

RIGHT:

新制
工
1414

弾性材料を使用した
浮体係留システムに関する研究

2006年

徳 淵 克 正

**弾性材料を使用した
浮体係留システムに関する研究**

2006年

徳渕克正

目次

第1章 序論	1
第2章 係留された小型浮体構造物に関する被災調査	7
2.1 緒言	7
2.2 調査方法	8
2.3 調査結果とその考察	9
2.3.1 被災発生の季節的傾向	9
2.3.2 被災発生的地域的傾向	10
2.3.3 被災状況の傾向	12
2.3.4 係留具破損の原因とその対策に関する考察	15
2.4 結言	19
第3章 浮体構造物被災の防止への弾性チェーンの適用とその材料特性	21
3.1 緒言	21
3.2 チェーン破断を防止する係留索の構造に関する検討	22
3.3 ゴム材の基本的特性	24
3.3.1 ゴム材の種類とその性質	24
3.3.2 加硫ゴムの加工工程	26
3.4 ゴム材料の耐久性に関する検討	29
3.4.1 各種構造物に使用されているゴム材の耐久性検討の必要性	29
3.4.2 橋梁の支承として使用されたゴムの耐久性について	29
3.4.3 ゴム材の耐摩耗性に関する実験的検討と砂防ダム天端保護材として使用されたゴム材の耐久性について	32
3.4.4 防舷材に使用されたゴム材の耐久性に関する検討	35
3.5 結言	40
第4章 弾性チェーンの静的載荷特性と衝撃力緩和効果に関する検討	43
4.1 緒言	43
4.2 弾性チェーンの機能に関する特徴	44
4.3 弾性チェーンの静的載荷特性に関する検討	46
4.3.1 チェーンリンク間の余裕量と静的載荷特性に関する検討	46
4.3.2 静的載荷特性に関するゴム材の拘束の効果	49
4.4 弾性チェーンの衝撃力緩和効果に関する検討	53

4.4.1	ゴム材の一般的な衝撃緩和効果について	53
4.4.2	模型実験による弾性チェーンの衝撃緩和効果の検討	58
4.4.3	実機規模の弾性チェーンを用いた衝撃载荷実験	66
4.5	結言	70
第5章	弾性チェーンの耐久性に関する実験的検討	73
5.1	緒言	73
5.2	弾性チェーンの製作工程について	73
5.3	長期使用時における弾性チェーンの特性変化に関する検討	75
5.4	実海域における弾性チェーンの耐久性	77
5.4.1	北海道留萌沖における実海域実験について	77
5.4.2	大分県の海洋牧場において使用された弾性チェーンについて	79
5.5	結言	84
第6章	バネ-質点系による係留索張力算定方法に関する検討	87
6.1	緒言	87
6.2	係留索張力の計算モデルとその計算方法	89
6.2.1	計算方法選定の方針	89
6.2.2	各質点の運動方程式	91
6.2.3	係留索のバネ特性のモデル化	93
6.2.4	係留系初期状態の計算	96
6.2.5	水面形・水粒子の運動および質点に作用する流体力の計算	100
6.2.6	海底面に接する質点の加速度・速度の取り扱い	111
6.3	水理模型実験結果と計算結果の比較	114
6.3.1	水理模型実験の概要	114
6.3.2	計算条件	114
6.3.3	係留索張力の評価方法	116
6.3.4	計算時間に関する検討	117
6.3.5	計算結果の検討	118
6.4	結言	119
第7章	弾性チェーンによる衝撃緩和効果と係留索の経済的設計の検討	123
7.1	緒言	123
7.2	係留索における弾性チェーン適用長さの衝撃張力低減に関する影響の検討	124
7.2.1	検討目的	124

7.2.2	検討対象とする係留系と波条件	125
7.2.3	弾性チェーンの適用長さと係留索に発生する衝撃張力の検討	128
7.3	弾性チェーンを適用する係留系の経済的設計方法に関する検討	132
7.3.1	係留索の経済的設計の概要	132
7.3.2	係留索の経済的設計手順	133
7.3.3	提案する手法を用いた係留索の試設計	135
7.4	結言	142
第8章	結論	145
	謝辞	149

第1章 序論

わが国は、北海道、本州、四国、九州といった面積の大きな島に加え、これらと比較して非常に面積の小さい多数の島によって構成された島嶼国である。これらの島のうち、特に離島振興法などに指定される島（以下、離島）は平成8年(1996年)4月1日における住民基本台帳によって住民の居住が確認されたものは325島とされている¹⁾。

これら離島は過疎と高齢化の進行によって経済的に苦しくなっているが、その一方で、先の離島振興法に記されているように離島は、排他的経済水域の保全、海洋資源の利用、および、自然環境の保全に重要な役割を担っているものが多い²⁾。特に、前者二項目の役割を考慮した場合、離島における住民の生活の安定が非常に重要となっている。そのためには円滑な物資の輸送が必要であり、船舶による交通が周辺海域での経済活動あるいは当該離島への物資・人員の輸送において重要な役割を占めている。このような海上交通においては、船舶の安全の確保、例えば座礁などの防止を目的とした航路標識の整備や荷役のための港湾整備が必要となる。

特に、南九州あるいは沖縄周辺に位置する離島は、一般的に知られているように台風の常襲地域であり海象条件が非常に厳しく、各種施設の整備の困難な場所でもある。加えて、海底地形の面でも水深が沖に向かうに従って急激に深くなる離島も存在する。こういった地域では、防波堤の築造が難しく、波浪の影響や地形の制約により船舶の接岸そのものが困難になる場合もあるため、船舶に係船ブイに係留して荷役をすることも行われている。また、航路標識は航行方法の変更などへの対応、あるいは固定構造物の築造が経済的に不利な場合もあることから航路標識ブイを用いることが多いと考えられる。一方、比較的海象条件の穏やかな離島でも、高齢化の進行から潮位差に追従することで船舶への乗降に負担の少ないポンツーンが用いられることが多い。これらのことから、離島周辺では浮体構

造物、特に小規模なものが多数用いられる状況であると言える。

このような浮体構造物は、航路標識ブイや係船ブイはチェーン等を、また、ポンツーンはチェーン等の他に杭を用いた係留具で係留され、これらの浮体を利用される箇所に固定されているのが普通である。しかし、台風や低気圧等、高波が来襲しやすい状況の後に係留具が破損し、小型の浮体構造物が漂流・消失している事例は多く報告されている。

小型浮体構造物の用途毎にそれらの漂流・消失の影響を考察すると、まず、航路標識ブイでは、海中に設置された潜堤や岩礁等の位置を示すことが困難となり、船舶の座礁等海難事故の原因となることが考えられる。係船ブイやポンツーンの漂流は、船舶の接岸や係留を困難とし、特に人や物資の輸送を船舶に頼る離島では経済的な影響を与えるばかりでなく、島内においても自然災害が発生している場合には住民の生命をも危険にさらすことになる。また、係船ブイやポンツーンは港内に設けられることが多く、これらが漂流した場合、他の港湾施設との衝突によって被災を拡大することもあり得る。他に、ポンツーンを浮き消波堤として使用している場合は、ポンツーンが漂流・消失すると十分な消波効果が得られず、消波堤の後背地に高波浪が来襲し、越波などにより護岸内の施設や建築物が被災する場合も考えられる。これらの状況に加え、漂流した浮体構造物が海岸に漂着したとき、周囲の動植物や自然環境に損傷を与えることも懸念される。

よって、小型の浮体構造物の係留具破損による漂流・消失は離島部の経済、災害救援活動、および、自然環境に少なからず影響を与えることが考えられることから、係留具の破損に何らかの対策をとる必要がある。しかしながら、離島部は厳しい経済状況に置かれている地域が多く、対策方法の効果のみならず経済性についても十分な検討が必要となるが、双方の条件を満たした対策の有効な検討方法は用いられていないことが現状である。

そこで、本研究では先に述べた離島の持つ排他的経済水域の保全および自然環境の保全と言った役割を鑑み、係留具破損による浮体構造物の漂流と、それに伴う周辺の経済活動と自然環境に対する災害を防止することを目的として以下に示す調査、検討を行う。

(1) 係留された小型浮体構造物に関する被災調査

上で述べたように、離島港湾や航路標識として用いられる浮体構造物は小規模なものが多いと考えられる。ここでは、このような小型浮体構造物を対象として被災状況を調査し、その原因となる現象について考察する。

(2) 浮体構造物被災の防止への弾性チェーンの適用とその材料特性

小型浮体構造物の被災原因が、台風時などの高波浪によって係留具への過大な荷重の作用や浮体動揺による係留具の損耗の結果として強度低下が主要な原因となる場合、弾性体による作用荷重の低減や損耗の防止が被災の防止方法として考えられる。係留索に弾性体を用いる手法に関しては、例えば、平石らによる多点係留ブイバースにおける係留張力に関する研究³⁾において検討された事例がある。ここでは、最も一般的に利用されていると考えられるチェーン係留された小型浮体構造物に着目し、それらを弾性化する方策とその適当な材料に関する考察を行い、選択した弾性材料の一般的特徴について調査を行う。

(3) 弾性チェーンの静的載荷特性と衝撃力緩和効果に関する検討

浮体構造物は波浪によって動揺を生じる。また、実海域における波浪は不規則波であることから、係留索には、時に衝撃的な張力が生じることが考えられる。よって、ここでは、弾性体を組み込んだ係留索（弾性チェーン）の静的な外力に対する特性、および、衝撃的な外力の発生についての特性を模型実験によって検討する。

(4) 弾性チェーンの耐久性に関する実験的検討

弾性チェーンには、実海域において長期間に渡る連続的な荷重の作用に対する耐久性についての検討が必要となる。そこで、実機に近似した規模の弾性チェーンに対す

る連続載荷，および，実海域に適用した弾性チェーンの材料等に関する調査を行い，弾性チェーンの耐久性に関する検討を行う．

(5) 係留索における衝撃張力とバネ特性が混在を考慮した係留索張力算定方法に関する検討

弾性チェーンを浮体構造物の係留索として利用しようとする場合，海象条件や浮体の規模に対して適切な強度，性能，および，適用長さについて設計しなければならない．弾性チェーンを用いた係留索の張力検討手法については，平石らにより鋼製索と弾性索の合成弾性率と衝撃力係数を用いた方法が提案されている⁴⁾．この方法は簡便に衝撃張力を算定することが可能であるが，この研究では水理模型実験に用いた弾性チェーンに対して衝撃力係数を設定しており，他の種類の弾性チェーンに対してこの設計手法を適用しようとした場合に，衝撃力係数の設定で困難が生じることが予想される．そこで，ここでは，多数のバネ特性が混在する係留索に対応し得る，衝撃張力に着目した計算機を用いた数値計算による係留索張力の算定方法，および，その適用性について検討を行う．

(6) 弾性チェーンを用いた係留系に関する経済性を考慮した設計の検討

弾性チェーンを利用することによって浮体構造物の防災効果が得られたとしても，弾性チェーンのコストが非常に大きなものとなれば係留システム全体の費用対効果が著しく劣る結果となる．よって，外力に適切に対応でき，かつ，経済性の高い最適な係留索を選定する手法が必要となる．このような手法については，例えば，上田らによるカテナリー理論による係留索の最適設計手法が検討されている⁵⁾．ただし，この手法は鋼製チェーンを対象としたものであることから，ここでは先に検討した数値計算による係留索張力の算定方法を用いることにより，係留システム全体の経済性を

考慮した弾性チェーンの強度と適用長さに関する設計方法について検討する.

参考文献

- 1) 離島統計年報：財団法人 日本離島センター, <http://www.nijinet.or.jp/rito.html>, 2004.
- 2) 離島振興法：昭和 28 年 7 月 22 日法律第 72 号.
- 3) 平石哲也・高山知司：多点係留ブイバースにおける係留張力と船舶の運動に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 735, 1992.
- 4) 平石哲也・富田康広：係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 816, 1995.
- 5) 上田 茂・白石 悟：カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表, 港湾技研資料, No. 379, 1981.

第2章 係留された小型浮体構造物に関する被災調査

2.1 緒言

わが国の周辺海域では、各種の浮体構造物が船舶航行の安全確保や産業・生活物資あるいは人員の輸送の維持、または消波を目的として建設されている。このような浮体構造物の規模は、近年では大型化の傾向が存在するものの、全長および全幅が 10m から 20m の比較的小型のものが一般的である。また、航路標識ブイではさらに小型のものがある。

このような浮体構造物は、波や風の作用によって設置対象地点から大きくずれることがないように何らかの方法によって係留されている。この係留方法としては図 2.1 に示すように浮体周辺に杭を設置し、ローラーを介して浮体を係留する方法、あるいは、鋼製のチェーンを用いて係留する方法などが用いられている。特に、後者の鋼製チェーンを用いた係留方法は航路標識ブイからポンツーンの係留などに広く使用されている。

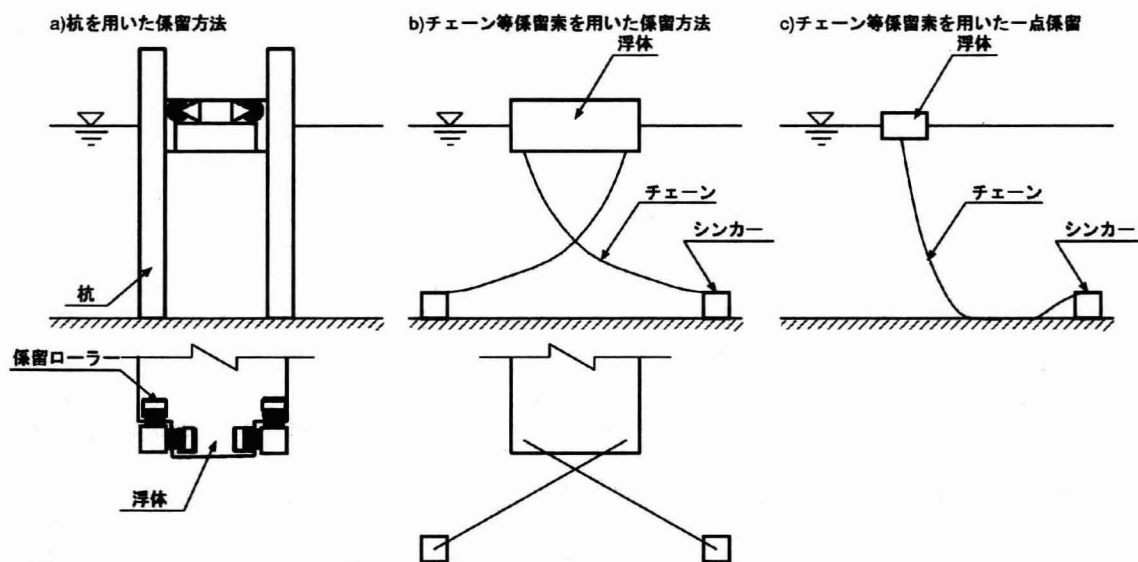


図 2.1 浮体構造物の係留方法

一方、このような小型の浮体構造物では、台風、低気圧あるいは季節風によって大きな波浪が作用すると、浮体の動揺量が増大し、チェーンなどの係留系に大きな荷重が作用するようになる。このような荷重の作用は、係留系の破損につながり、その結果として浮体構造物の流失や漂流を招く。

そこで本章では、小型浮体構造物における被災軽減方法を提案することを目的として、小型浮体構造物の被災事例に関して調査を行った結果について述べる。

2.2 調査方法

調査方法としては資料による文献調査を行うものとし、その資料として平成4年度(1992年)から平成8年度(1996年)の5年間にわたる「港湾構造物被災施設に関する調査票」¹⁾を用いた。この調査票は、被災が生じた港湾施設に対して下記の事項が報告されている。

- (1) 県名・港湾名・管理者名・施設名・所在地・築造および改良年月日
- (2) 被災の経歴
- (3) 被災時の自然条件
 - 異常気象名・被災年月日
 - 潮位・波浪・最大風速など
- (4) 被災状況・復旧方針・被災写真
- (5) 位置図・平面図・被災前断面図・復旧断面図

この調査票から、まず浮体構造物に関する被災事例を抽出し、記載された被災状況を分類して、被災の原因について考察を進めることとした。

なお、この調査票に記載されている被災事例は、港湾施設に関するものが主であり、航路標識ブイなどの航行安全に関する施設に関する事例については述べられていないため、こ

ここでは浮桟橋あるいは係船ブイなどの船体の係留や荷役作業に用いられる浮体構造物に限って調査を行った。

また、資料は 10 年程度前のものであるが、資料としては被災の傾向は現状のものとはほとんど変わらないものと考えられるために、入手できたこの資料を用いた。

2.3 調査結果とその考察

2.3.1 被災発生の子節的傾向

平成 4 年度 (1992 年) から平成 8 年度 (1996 年) の 5 年間の「港湾構造物被災施設に関する調査票」のうち、浮桟橋あるいは係船ブイに関する被災事例は 31 件である。まず、小型浮体における被災発生についてその季節的な傾向に着目し、調査結果を示す。図 2.2 は、各年度の係留浮体に関する被災発生件数を月毎に示したものである。

この図からわかるように、小型浮体の被災は各年度とも 7～9 月の夏期から初秋にかけて高い頻度で発生している。表 2.1 は、これらの被災が発生した期日に生じていた気象擾乱を示したものである。この表から、ほとんどの被災事例において台風による強風および高波浪が浮体構造物に影響を及ぼしたと考えられる。

一方、図 2.2 によると、1995 年度には冬期風浪によって被災が 1 件発生している以外は、浮体構造物における被災はない。これは 1995 年にはわが国に大きな台風の来襲がなく²⁾、その結果、浮体構造物に強風や高波浪が作用しなかったためと考えられる。以上の調査結果から、小型浮体構造物の被災要因としては、台風の影響が最も顕著なものであると言える。

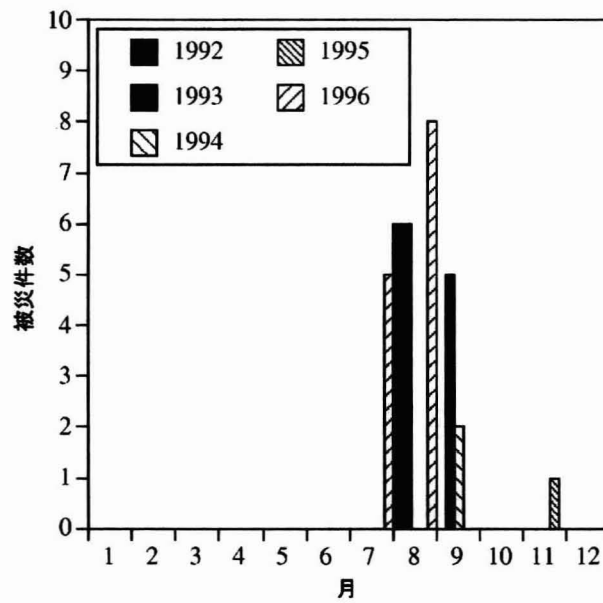


図 2.2 被災発生のも別頻度

表 2.1 係留浮体に被害を及ぼした気象擾乱

年度	気象擾乱の名称	影響を及ぼした期間	年度	気象擾乱の名称	影響を及ぼした期間
1992	台風 10 号	8/7~8	1995	低気圧	11/8
	台風 7 号	8/8~10	1996	台風 8 号	7/30
1993	台風 12 号	9/3		台風 12 号	8/13~14
	台風 13 号	9/3			
1994	台風 24 号	9/24			
	台風 26 号	9/27			

2.3.2 被災発生のも域的傾向

被災事例が発生した地域を図 2.3 に示した。港湾における浮体構造物の被災は、浮棧橋については瀬戸内海、有明海あるいは大村湾、鹿児島湾などの内海あるいは湾部に集中する傾向にあり、太平洋および日本海など外海に面した港湾では被災事例が調査対象期間内では存在しないことがわかる。また、沖縄県離島部では、係船ブイが 1995 年を除く各年に被災を受けている状況にある。

このように浮棧橋の被災事例が瀬戸内海や大村湾などに集中した原因について以下のよう
に考えられる。浮棧橋は一般に波浪が小さく、潮位変化の大きい港に小型船係留用に建
設される。この地域は、浮棧橋の建設条件に適合するとともに、多数存在する離島との小
型船舶を用いた連絡航路が多く、浮棧橋の適用が費用と利便性から効果が高く、その結果、
浮棧橋の設置基数が非常に多い。従って台風などの気象擾乱時にはこれらの被災が集中し
て発生する傾向にある。

これら浮棧橋の被災事例の分布は、台風あるいは低気圧の経路に密接に関係している。例
えば、被災が中国地方に集中している 1992 年の事例では、被災は台風 10 号によって起こ
され、この台風は中国地方を縦断する経路をとっている³⁾。また、被災が長崎県および熊本
県に集中した 1996 年では台風 12 号が奄美・大隅諸島を暴風域に巻き込む進路をとった⁴⁾。
このように、浮棧橋の被災は台風の経路上に位置する港湾において発生する傾向を示して
いる。

一方、南・北大東島では、係船ブイの被災事例が顕著である。これは、この地域の周囲が
崖状の地形となっているため護岸が高く、船舶が岸壁に接岸することが困難であるために
係船ブイを用いて船舶を係留し、荷役を行うといった港湾の利用形態^{5) 6)}に加え、外洋に面
しており台風の来襲頻度も高いことから係船ブイが恒常的に波高の大きな波浪の影響を受
けやすいことが原因であると考えられる。

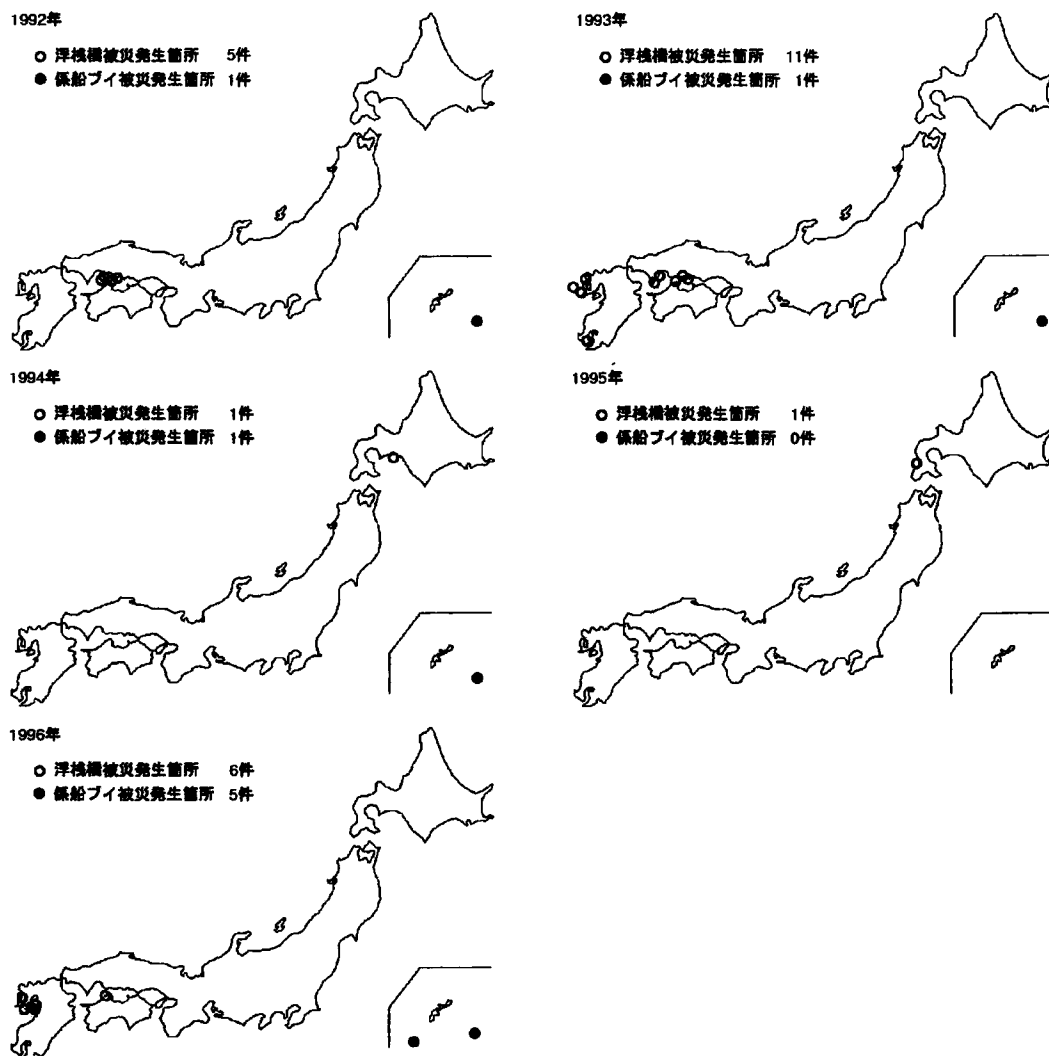


図 2.3 被災事例の発生地域分布

2.3.3 被災状況の傾向

被災状況を5項目に分類して、表2.2に示した。図2.4は、表2.2に従って分類した被災状況の延べ件数を示したものである。被災事例が1件でも、複数の被災項目を含んでいるものがあり、31件の被災事例に対して全延で件数としては53件になっている。この調査結果では、係留具の破断・損傷が延べ件数53件の被災件数のうち20件を占めており、最も被災件数が多い。係留具の破断・損傷のうち、チェーンを用いて係留された浮体構造物の

被災は18件、ローラー材を用いたものは2件であった。以下、浮体の流失・漂流9件、渡橋の落橋・損傷9件、浮体の浸水・水没8件、そして上部工破損7件が続いている。

表 2.2 被災状況の分類

被災状況の分類	被災内容
係留具破断・損傷	浮体の係留に用いられているチェーンあるいは係留用ローラーが破断・損傷したケース
浮体流失・漂流	浮体が設置位置から移動し存在が確認できない、あるいは海岸等に漂着したケース
渡橋落橋・破損	浮栈橋への連絡橋が落下あるいは、支承部が破損したもの
浮体浸水・水没	浮体内部に海水等の侵入した、または水没に至ったケース
上部工破損	浮栈橋等の上部に設置された係船柱や屋根等が損傷したケース

これらの被災状況の中で最も顕著であるのが係留具の破断・損傷である。浮体の流失・損傷や渡橋の落橋・損傷は、係留具の破断・損傷に関連して発生する傾向がある。つまり、係留具の損傷によって風および波による浮体の動揺量が増大し、その結果、浮体の流出や渡橋の落橋のような被災が引き起こされる。杭係留の浮体において、ローラー材を用いている場合には、ローラーによって浮体の動揺を拘束しているために大きな圧縮荷重が作用してローラーを破壊する状況、あるいは、潮位の異常な上昇と高い波高の波とが同時に発生する台風などの気象条件では、ローラーの係留杭からの脱輪が生じている。

また、浮体の浸水・水没は浮体上への越波が原因と考えられるが、係留具の破損により浮体の動揺量が増加して、浮体甲板と水面との距離が縮まり、このことが浮体上への越波を助長しているとも考えられる。一方、上部工の破損については、浮体の係留索を固定している係船柱に生じやすいと考えられる。また、主に旅客を対象とした浮栈橋では浮体上に屋根が設けられる場合があり、これが強風によって破損するケースも存在する。

以上のことから、小型浮体の被災状況では係留具の破損が最も顕著なものであり、これが他の被災状況、すなわち、浮体の漂流、渡橋の損傷、あるいは浮体の水没などの状況を生じさせる原因となり得ることが言える。

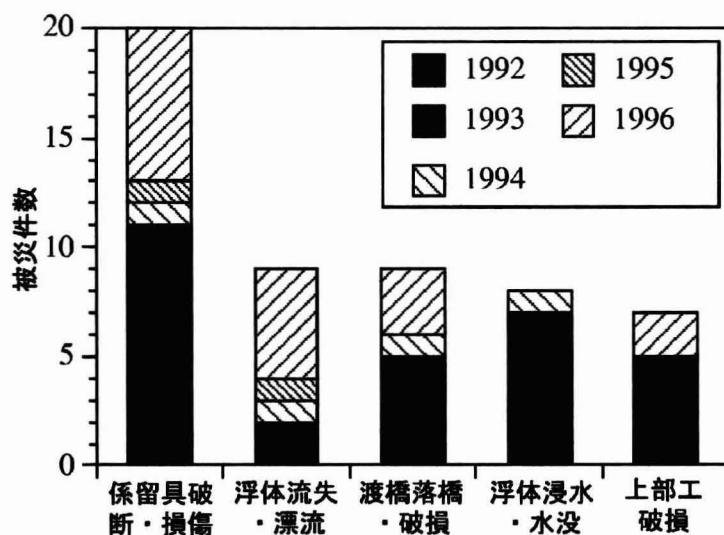


図 2.4 各被災状況の発生頻度

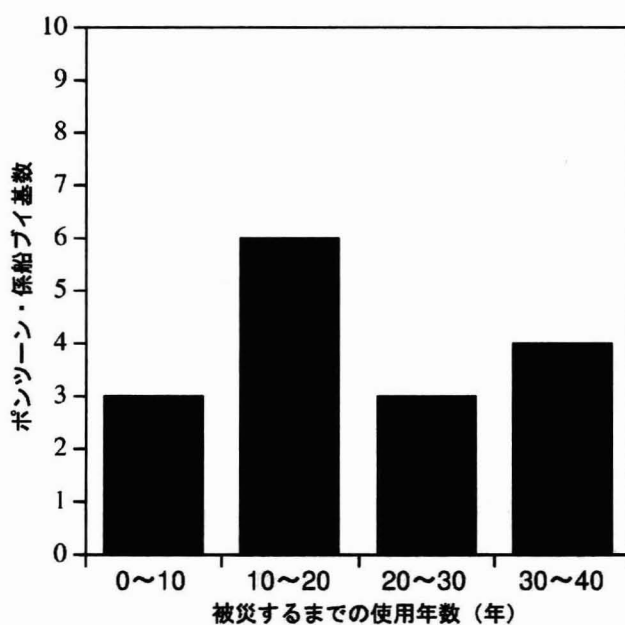


図 2.5 係留索が破断した浮体の被災に至るまでの使用期間

次に、特に顕著であった係留具の破損による被災事例について着目し、浮体の耐用年数との関連について調べた。設計計算例等から調べると、一般に浮桟橋の耐用年数は10年～30年で設計されている⁷⁾⁸⁾。そこで、係留具が破損したことにより被災した浮体について、被災に至るまでの使用期間を調査した。その結果を図2.5に示している。図2.5によると、係留索の破断によって被災した浮体のうち被災に至るまでの使用年数が30年を経過していないものは調査対象の75%を占めている。特に係船ブイの係留索では定期的な点検がなされていると思われるが、被災例のうち5件が20年未満で係留索の破断が記録されている。但し、耐用年数を満足するか否かについては、係留具以外、例えば函体の使用状況や保守状況、および設計に対する考え方が大きく影響するため、一つの原因を特定することは困難ではあるが、係留具の破損が浮体の耐用年数内での破損の要因の一つであると考えられる。

2.3.4 係留具破損の原因とその対策に関する考察

以上に述べたように、港湾に設置された浮桟橋および係船ブイなどの小型浮体構造物における被災状況では係留具の損傷に至る事例が最も多く、その原因は、台風などの気象擾乱が顕著なものであることが明らかとなった。

これらの浮体構造物の係留材としては鋼製のチェーン、あるいは杭式係留の浮体ではローラー材を用いることが一般的である。係留に用いるローラー材は、写真2.1に示すように樹脂あるいはゴム材で作られたローラー部と、ゴム材で作られたクッション部で構成されている。杭式係留では潮位の変動については、浮体を拘束する杭とローラー材の回転によって、そして浮体の動揺についてはローラー材の回転とクッション部の圧縮・せん断変位の双方によって対応する。



写真 2.1 係留ローラーの一例

一方、チェーンを用いた係留方式では、浮体の動揺はチェーンの自重によって安定を計り、潮位は潮位の変動を考慮したチェーンの長さで対応する。チェーンを用いた係留方法は、浮栈橋および係船ブイ、いずれの浮体構造物の係留も最も一般的に用いられている。ここでは、チェーン係留された浮体における係留具の破損について考察を進める。

鋼製チェーンを用いて浮体を係留した場合の係留索の破断については、平石らの実験⁹⁾により検討されている。この実験ではφ60 JIS F 3303 (2種) スタッドリンクチェーンを係留索とした浮体に有義波高 $H_{1/3} = 6\text{ m}$ 以上の波が作用したとき、最大張力が980~1176kN程度となることが示されている。この張力とφ60 スタッドリンクチェーンの切断試験荷重は1490kNでチェーンが破断する荷重に対して65~85%の張力となっており、強度に関しては余裕を有していると言える。一方、鋼材は、接触・摺動部において摩耗が生じていると共に、海中では鋼管杭に1mm/年以上の摩耗が生じる場合もある¹⁰⁾。

これらの点から、鋼製チェーンを用いた係留索の破断は、鋼製チェーンの摩耗進行と波浪による大きな張力の発生することによる複合した原因によると考えられる。すなわち、浮体構造物の係留に鋼製チェーンを用いている場合、通常、図 2.6 に示すように海底面に接

触した部分と、海底面から立ち上がった部分が存在する。特に、海底面から立ち上がった部分のチェーンリンク間には、チェーンの自重によって互いに接触した状態となっている。当然、浮体は気象擾乱時以外においても動揺しており、このとき、チェーンリンクが接触した部分にはリンクの摺動によって局所的な摩耗が生じやすくなる（図 2.7）。加えて、図 2.6 に示した海底面に接触した部分のチェーンにおいても海底の砂あるいは岩との接触により摩耗が生じる。このようにチェーンに摩耗が生じた場合、チェーンリンクの断面積が減少し、その機械的強度が低下する。

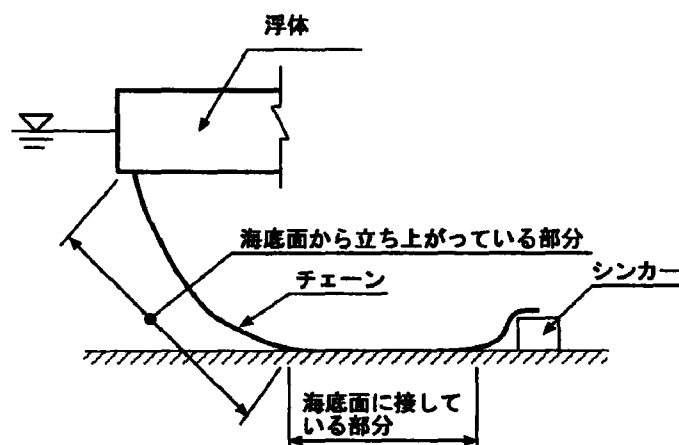


図 2.6 浮体係留時のチェーンの形状

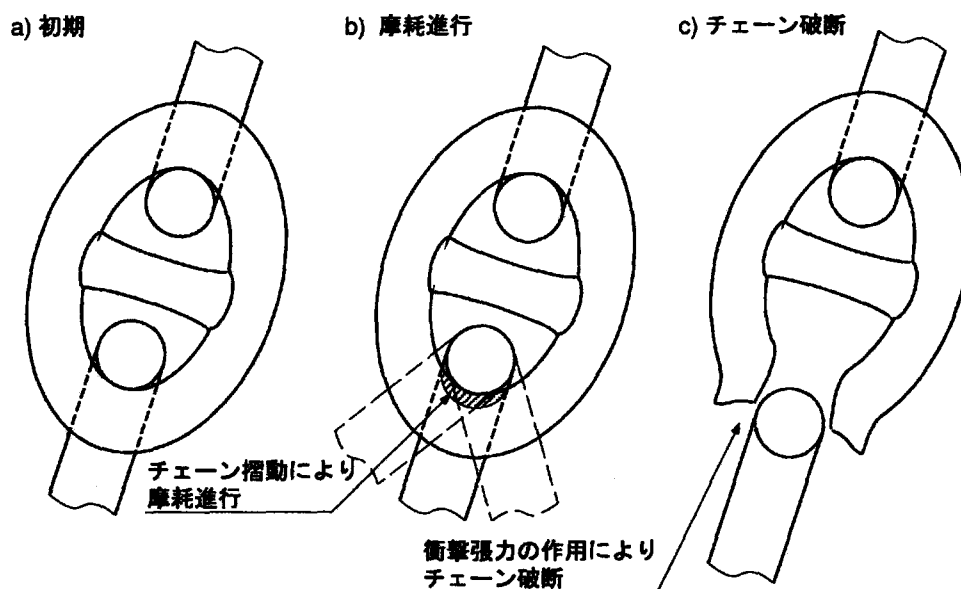


図 2.7 チェーンリンク間の状態

また、小型の浮体構造物における係留具の破断は、台風などの気象擾乱時に多く発生していることが先の調査結果により示されている。通常の浮体動揺においてはチェーンの自重の効果によって係留チェーンに過大な張力が作用することは無いが、気象擾乱時では高潮によって係留チェーンが緊張状態になりやすく、さらに風あるいは波浪の影響によって浮体の動揺量が増大し、チェーンに衝撃的な張力が作用するようになる。特に、先に述べたように摩耗によってチェーンリンクの機械的な強度が低下した状態では、このような衝撃張力が係留チェーンの破断の原因となり得ることが考えられる。これら小型浮体構造物の被災の発生要因を気象・海象条件と材料の二つの側面からまとめたものが図 2.8 である。

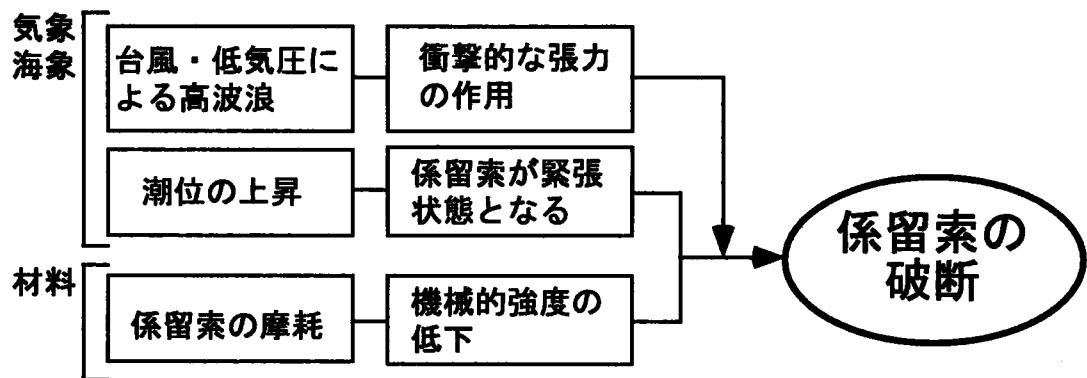


図 2.8 係留索が破断に至る過程

以上のことから、小型の浮体構造物、特にチェーンを用いて係留された浮体における係留具の破損あるいは破断を防ぐ方法として、(1)チェーンのリンク間の接触および海底面などの接触が原因となる摩耗を防ぎ、その機械的強度の低下を防止する、(2)高波浪および高い潮位によって生じる衝撃的な張力の低減を計る、といった対策をチェーンに施すことが有効と考えられる。

2.4 結言

以上の調査結果より、小型の浮体構造物における被災の特徴として下記の点が示唆される。

- (1) 小型浮体構造物のうち、浮棧橋の被災は瀬戸内海あるいは鹿児島湾などの内海において発生の頻度が高い。これは内海では波高が低く、浮棧橋の設置が容易であることや、潮位変化が大きな地域では荷役等の利便性を確保するために潮位に追従しやすい浮棧橋を利用する傾向が強く、その設置基数が多いことによる。
- (2) 一方、沖縄県の離島では、海岸地形が急峻なため岸壁の建設が困難であることから係船浮標の利用が多く、台風の来襲により高い波高の波が作用しやすい地域でもあることから、係船浮標の被災が顕著である。
- (3) 浮体の被災発生時の気象条件としては、台風によるものがほとんどである。
- (4) 小型の浮体構造物における被災状況では、係留具の破損あるいは破断が生じた事例が顕著であること。その中で、チェーンを用いて係留された浮体の被災の頻度が高い。
- (5) チェーンによって係留された浮体の係留具の破損原因としては、チェーンリンク間の摺動あるいはチェーンの海底面との接触による摩耗による係留具の機械的強度の低下、および上記気象擾乱時における衝撃的な張力の発生が考えられる。

これら小型浮体構造物の被災状況からその被災頻度を低減する方法として、係留具、特にチェーンを使用したものについては、

- (1) チェーンのリンク間の接触および海底面などとの接触が原因となる摩耗を防ぎ、その機械的強度の低下の防止すること。
- (2) 高波浪および高い潮位による衝撃的な張力の低減を計ること。

の2点が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局：港湾構造物被災施設に関する調査票，1992～1996.
- 2) 永井紀彦・菅原一晃・渡邊 弘・川口浩二：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1995)，港湾技研資料，No. 859，p. p. 5，1997.
- 3) 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1992)，港湾技研資料，No. 770，p. p. 11～69，1994.
- 4) 永井紀彦・渡邊 弘・菅原一晃・川口浩二：全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1996)，港湾技研資料，No. 894，p. p. 14～75，1998.
- 5) 南大東村役場：南大東島ホームページ，<http://www.ii-okinawa.ne.jp/people/minamiya/>，2000.
- 6) 北大東村役場：大東村ホームページ，<http://www.ii-okinawa.ne.jp/people/kdaito/>，2000.
- 7) 社団法人全国漁港協会：漁港の防波堤・けい船岸等の設計指針と計算例，p. p. 515～590，1988.
- 8) 社団法人日本マリーナ・ビーチ協会：プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル，p. p. 28，1997.
- 9) 平石哲也・富田康広：係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験，港湾技研資料，No. 816，1995.
- 10) 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久：漂砂による防食鋼管杭の摩耗特性に関する研究，海岸工学論文集，第37巻，p. p. 394～398，1990.

第3章 浮体構造物被災の防止への弾性チェーンの適用とその材料特性

3.1 緒言

前章において、浮体構造物における被災事例としては係留具の破損によるものが最も多く、特に係留チェーンの破断によるものが最も顕著であると述べた。そして、係留チェーン破断の原因としては以下のことが考えられる。

- (1) 台風あるいは低気圧の来襲時の潮位上昇により係留チェーンが緊張状態となりやすいこと。
- (2) 台風等による高波により係留チェーンに衝撃的な張力が作用しやすくなること。
- (3) チェーンリンク間の摺動あるいは海底面との接触によりチェーンが摩耗し、チェーン直径が小さくなり、その機械的強度が減少すること。

従来、チェーンの摩耗を考慮した設計方法としては、年間 $\phi 1\text{mm}$ の摩耗代を考慮して係留チェーンの径を決定する方法が取られている¹⁾が、係留チェーンの使用条件によっては摩耗が速く進行する場合も存在するため、この方法は必ずしも確実なものとは言えない。また、衝撃的な張力に対する対策はほとんど考えられていない。

そこで、衝撃張力と摩耗が原因となる係留チェーンの破断への対策として、

- (1) 係留チェーンに衝撃力の緩和効果を持たせる
- (2) チェーンリンク間の摺動を拘束し、加えてチェーン外面を何らかの材料で被覆する

という二種類の方法が考えられる。次節から、対策を実現する係留索の構造について示し、その構成材料の選定と機能に関して述べる。

3.2 チェーン破断を防止する係留索の構造に関する検討

前述の係留チェーンの破断を防止するためには衝撃的な張力を低減し、かつ、チェーン外面を被覆することが考えられる。まず、衝撃張力の低減を実現する方法としては、オイルダンパーなどの機械的な構造を用いる方法、あるいは樹脂系の衝撃緩和効果を有する材料を用いる方法が考えられる。

このうち、機械的な構造を用いる方法では衝撃力の目標とした衝撃緩和効果を得るために必要な性能を設計することが比較的容易である反面、金属材料を多用し、可動部分が多くなるために水中や splash zone における使用が困難となること、あるいは高額な製作コストが必要になることが懸念される。

一方、樹脂系の衝撃緩和効果を有する材料を用いる場合、衝撃緩和効果の設計に関しては材料の荷重－変位特性に左右され、特に非線形性の強い特性を持つ材料では容易に衝撃緩和効果を推定することが困難となる。しかしながら、耐海水性や耐摩耗性を有する材料を選択することが可能となり、衝撃的な張力の緩和とチェーン摩耗の防止の2点を実現することができる。以上のことから、係留チェーンの破断を防止する方法として、樹脂系の材料を使用した対策を取ることが適当と考えられる。

そこで、係留索の摩耗および衝撃緩和効果を行う構造として図 3.1 に示した鋼製のチェーンをゴム材に埋設したものがある。この構造は、チェーンの外面をゴムで被覆することによってチェーンと海底面の砂あるいは岩等との接触、および、チェーンリンクをゴム材によって拘束することによりリンク間の接触部分の摺動による摩耗の発生を防止・抑制するものとなっている。

また、係留索に作用する衝撃張力の低減については、鋼製チェーンのリンク間に隙間を持たせた状態でゴム材に埋設することによってこの隙間にゴム材を充填させ、張力が作用した際にチェーンリンク間のゴム材が図 3.2 に示すように圧縮されることによって係留索が大きな変位量を生じ、係留索に作用する張力を低減する特徴を持つ。この特徴はゴム材の

弾性を利用していることから、この構造を以下「弾性チェーン」と呼称する。

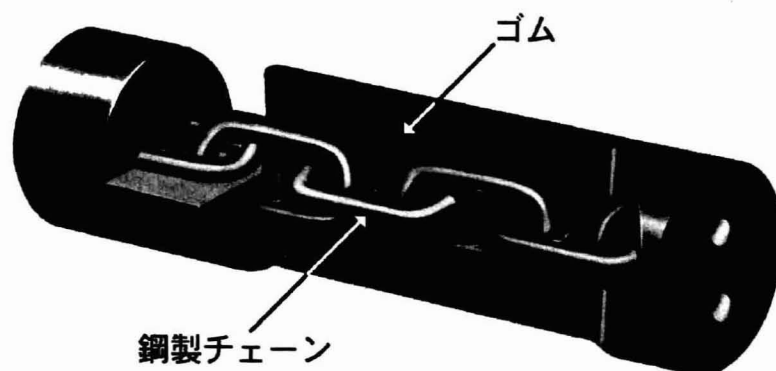


図 3.1 弾性チェーンの構造

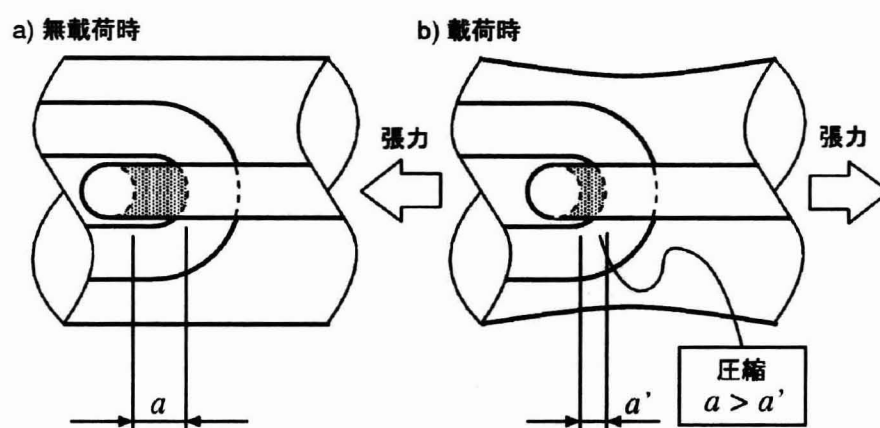


図 3.2 引張荷重載荷時の弾性チェーン

上述のように、弾性チェーンは基本材料としてゴム材を用いることを提案しているが、長期に渡り使用され、そして、比較的大きな荷重が作用する浮体構造物の係留索として使用するため、その基本的物性および耐久性に関して調査・検討を行うことが重要である。

そこで、次節では、弾性チェーンに使用するゴム材の基本的性質および耐久性に関する調査・実験について述べる。

3.3 ゴム材の基本的特性

3.3.1 ゴム材の種類とその性質

ゴム材は様々な建設・工業材料として用いられており、これらは大きく天然ゴム系と合成ゴム系の二種類に分けられる。これらの最も大きな違いはその原料である。天然ゴムの原料は写真 3.1 に示した樹木（ヘベア・ブラジリエンス）から得られる樹液を加工したものである¹⁾。それに対して、合成ゴムは石油の精製物から化学的に合成して得られるものである。



写真 3.1 ゴムの木

また、天然ゴムと合成ゴムは物理的および化学的性質においても相違がある。それらを代表的なゴム材の種類についてまとめたものが表 3.1 である。この表から分かるように、天然ゴムは他の合成ゴムと比較して耐摩耗性や引張強度などの物理的な特性に優れる一方、オゾンや紫外線、または油に対する溶解など化学的な劣化に対する耐久性が劣るという性質を持つ。

一方、合成ゴムでは必要な特性、例えば、耐油性や耐薬品性などを得るために化学的な組成を様々に変化させることによって多様な目的に適合したゴム材を得ることが可能である。

表 3.1 主なゴム材の特性比較

ゴムの種類	主な特徴	引張強さ (MPa)	伸び (%)
天然ゴム (NR)	最も一般的なゴム材。耐摩耗性、引張強度などの物理的な特性に優れる。	3~25	1000~100
イソプレン (IR)	天然ゴムとほぼ同等な性質を持つ。	3~30	1000~100
スチレンブタジエンゴム (SBR)	天然ゴムよりも耐摩耗性、耐老化性に優れる。安価である。	2.5~30	800~100
クロロプレンアクリロゴム (CR)	耐候性、耐オゾン性、耐薬品性、耐熱性など平均した特性を持つ。	5~25	1000~100
ニトリルブタジエンゴム (NBR)	耐油性、耐摩耗性、耐老化性に優れる。	5~25	800~100
ブチルゴム (IIR)	耐候性、耐オゾン性、耐ガス透過性に優れる。	5~20	800~100
エチレンプロピレンゴム (EPDM)	耐老化性、耐オゾン性および耐酸・耐アルカリ性に優れる。	5~20	800~100

表 3.1 によれば、合成ゴムでも天然ゴムに比較的近い物理的特性を有しているものが存在することがわかる。スチレンブタジエンゴムは実際に天然ゴムの代用品として利用された事例もある。しかし、実際に工業材料として使用されているゴム材に着目すると、大きな摩擦力や衝撃力が繰り返し作用する分野では天然ゴムの使用が一般的である。例えば、頻繁に船舶と接触し大変形を繰り返す防舷材、あるいは着陸時に衝撃力を受け、非常に大きな荷重によって圧縮されつつ摩擦力を受ける航空機用タイヤ等は天然ゴムが利用される。

ゴム材の強度を決定する化学構造面での性質として、ゴム材ポリマーの結晶性が挙げられている。結晶性の大きいポリマーは延伸することによって結晶構造を取りやすく、このため力学的な強度も大きくなるとされている。一方、非結晶性のポリマーは延伸しても結晶構造を取りにくく、力学的強度も現れにくい性質を有している。天然ゴムは結晶性の大きいポリマーの一つとされており、また、スチレンブタジエンゴム (SBR) などの合成ゴムは、

本来、非結晶性の構造を持つものが多い。これは、合成ゴムポリマーの分子構造そのものが結晶性を持ちにくいものや、本来は結晶性を有するポリマーであるが、ゴム状弾性を与えるために結晶性を無効化しているためである。よって、合成ゴムに大きな力学的強度を与えるためには多くの補強用充填剤を使用しなければならない²⁾。表 3.1 の引張強度は、補強用充填剤を用いたときの強度である。また、一般に合成ゴムのポリマーは高価であるとともに強度を得るために多くの補強剤を必要とする。このため、元来、大きな力学的強度を有する天然ゴムと比べるとコストが上昇する。

以上のことから、防舷材や航空機用タイヤなどの大量のゴムを使用する製品や、大変形・衝撃・摩耗などに対応するため十分な力学的強度を有する用途には天然ゴムを使用する実績が多い。弾性チェーンは、浮体係留時に作用する衝撃的な張力に対応する必要がある、使用条件によって大量のゴム材を必要とする場合も予想される。これらのことから、弾性チェーンの主要材料として天然ゴムを用いることは、強度および経済性の面から妥当と考えられる。

3.3.2 加硫ゴムの加工工程

防舷材などの製品となったゴム材に荷重を加えると、弾性を有するために除荷すると再びもとの形状に復元する。しかし、原料ゴム（いわゆる生ゴム）に載荷し、変形を生じさせた後に除荷した場合においては塑性変形を起こし、もとの形状に復元しない。

これは、原料ゴムではこれを構成する糸状分子が絡み合った状態になっており、荷重を加えて変形させた場合でも分子の絡まりが元の状態に戻らないために塑性変形が生じると考えられる（図 3.3a）。しかし、生ゴムの糸状分子間を硫黄などの分子で結合すると、結合を行っている分子の分子間力の働きにより弾性変形を生じるようになる（図 3.3b）。これがゴムの架橋と呼ばれる現象である。

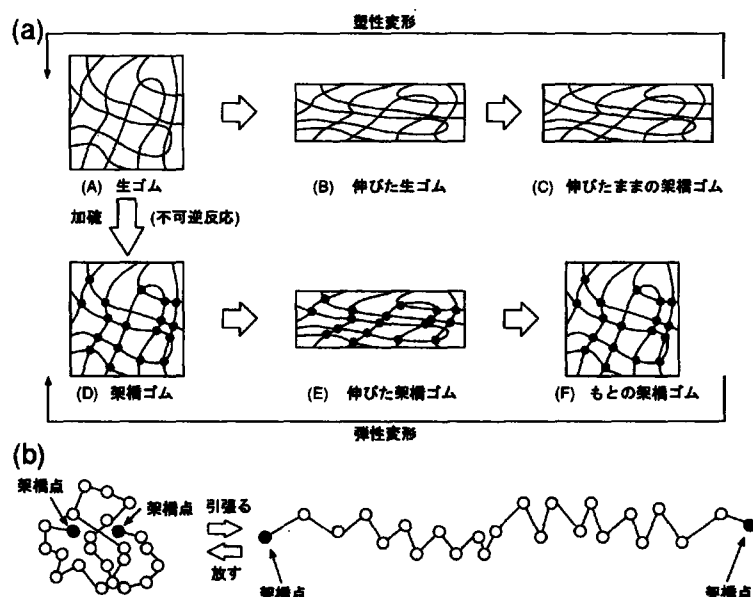
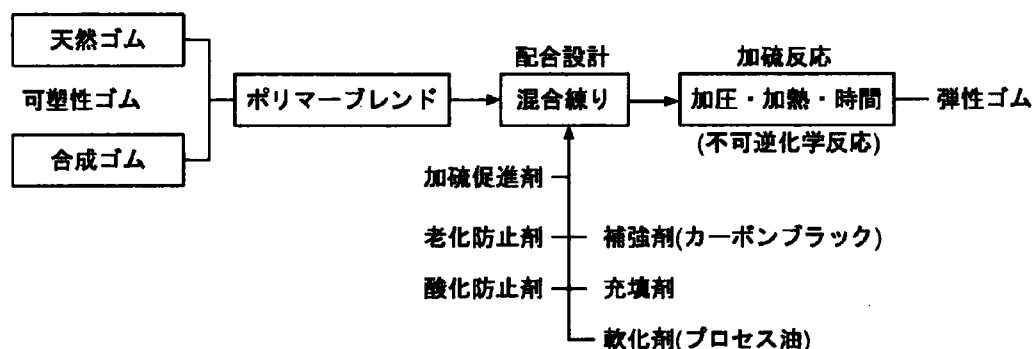


図 3.3 ゴム高分子の架橋の模式図²⁾

架橋を起こさせる物質としては様々なものが用いられるが、硫黄が一般的である。特に硫黄を用いてゴムの架橋を行うことを「加硫」と呼び、このような処理の行われたゴム材を「加硫ゴム」と呼ぶ²⁾³⁾。加硫は、単に原料ゴムに硫黄を混合するだけでは生じず、そのようなゴム材に熱と圧力を作用させることによって生じる現象である。

加硫を行うことは、ゴム材の強度も向上させる。例えば、スチレンブタジエンゴム (SBR) の場合、未加硫物の引張強度は 0.1N/cm^2 程度であるが、加硫を行うことによって 20N/cm^2 程度まで強度が向上される³⁾。

加硫ゴムの製造過程は、一般に図 3.4 に示す過程で行われる。原料ゴムは、まず素練りと呼ばれる工程である程度の軟らかさを持つ可塑性ゴムとされる。この可塑性ゴムに、上述の架橋を生じさせるための硫黄等の物質と混合する。

図 3.4 加硫ゴムの製造過程²⁾

上述したように、全く薬剤の添加などを行わない天然ゴムはオゾンや紫外線などに対しての耐久性が劣る材料である。よって、図 3.4 の混練りと呼ばれる工程において、加工性を向上させる軟化剤、酸化防止剤、オゾン劣化防止剤、加硫剤、および強度を向上させるカーボンブラック等を原料ゴムに混合する。天然ゴムを用いたゴム材は各種薬剤の配合を変化させることによって、様々な硬さや耐久性を有するゴム材を製作することが可能となる。なお、以下の節で説明する土木構造物に利用するゴム材は、これら各種薬剤が混合されたものである。

以上の過程を経た原料ゴムは可塑性を保っており、この可塑性を利用して様々な形状、例えば防舷材などの外形に整形される。弾性チェーンでは、ゴム材へのチェーンの埋設やチェーンリンク間へのゴム材の充填が、この過程で行われる。その後、上述の加硫と呼ばれる工程となる。加硫は、加硫剤を混合したゴム材に熱と圧力を加えることで行われ、その温度と圧力は成形する物の規模に依存するが、一般に $170\sim 180^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{N}/\text{cm}^2$ 程度で行われる。

3.4 ゴム材料の耐久性に関する検討

3.4.1 各種構造物に使用されているゴム材の耐久性検討の必要性

先に浮体構造物の係留索として鋼製のチェーンとゴム材を複合することにより、耐摩耗性と張力の緩和性能を有する弾性チェーンを使用することを提案した。その主材料は、係留索の使用条件、例えば、連続的に荷重が作用することや海底面との接触などによって常に摩擦力を受けやすいことから、このような使用条件に対して最も適合すると考えられる天然ゴムを選択した。

確かに、材料の力学的特性の面で検討すると天然ゴムを使用することが適当であると考えられるが、一方、天然ゴムは紫外線やオゾンに対する耐久性が合成ゴムと比較して劣るため、様々な薬剤を原料ゴムに混合することによってこれらに対する耐性が与えられている。実際の使用環境において、このような処理を施した天然ゴムがどの程度の耐久性を有するかを検証しておくことは重要である。

そこで、実際に橋梁、砂防ダムそして防舷材に使用されたゴム材の耐久性を以下で検討する。

3.4.2 橋梁の支承として使用されたゴムの耐久性について

波浪によって浮体が動揺することによって、係留系である弾性チェーンには連続的に荷重が作用する。他の構造物に使用されるゴム材で、比較的これに近い荷重条件下で使用されるゴム材を用いた部材としては橋梁の支承材が挙げられる。

ここでは、天然ゴムを使用した橋梁の支承材の長期経時変化について調査したデータ⁴⁾を紹介する。このデータは、1889年にオーストラリアのメルボルンに設置された橋梁のゴム支承について調査が行われたものである。この橋梁はおよそ100年後に付け替えが行われ、その際に併せてゴム材をサンプリングし、ゴム材の経時変化について測定を行なった

ものである。なお、この支承材に用いられたゴムは、その製作された時代から天然ゴムであると考えられる。

図 3.5 は、当該の橋梁におけるゴム支承材の設置状況を示したものである。ゴム支承材は橋脚と橋桁の間に設置されており、その幅は 1255mm のものであった。ゴム材のサンプルは、ゴム支承の外側と内側で行われた。そして、図 3.6 は、それぞれのサンプルに関する全網目密度の分布を示したものである。

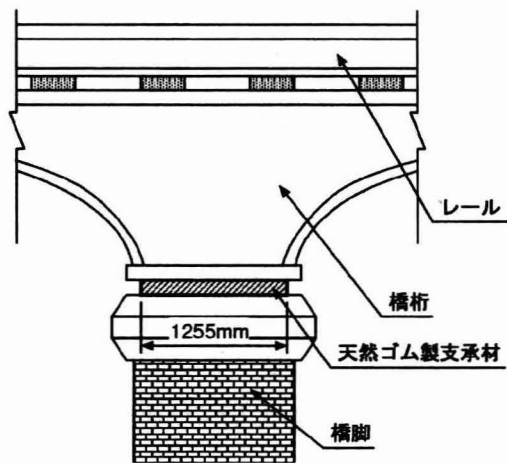


図 3.5 ゴム支承材の使用状況の模式図⁴⁾

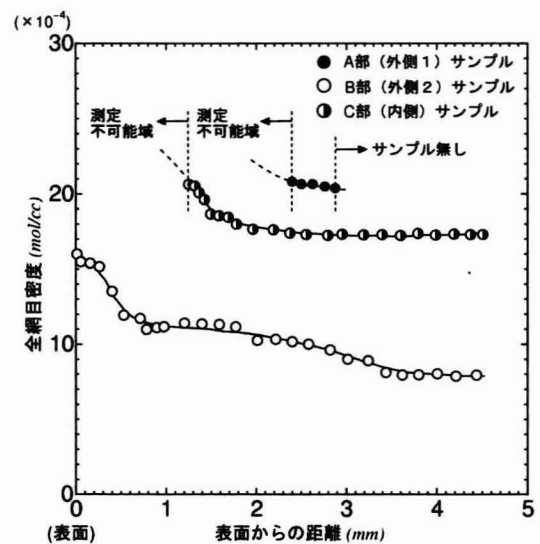


図 3.6 サンプル表面から内部への全網目密度の分布⁴⁾

なお、全網目密度とは、架橋点、すなわち図 3.3b) に示したゴム分子間をつなぐ硫黄などで構成された点の単位体積中の量を示したものである。この値はゴム材の劣化を直接示す値ではないが、ゴム材の物性が架橋点の量に依存することから、この値が変化することがゴムの物性に変化を及ぼすと考えることができる。このことから、全網目密度はゴムの耐久性を示す一つの指標となり得るため、ゴム材の劣化や耐久性を議論する際にしばしば用いられる値である。

図 3.6 によると、支承材の外側からサンプリングされた試料であるサンプルAでは表面からおよそ 2mm、サンプルBではおよそ 1mm の範囲で測定が不可能となっているが、全網目密

度は表面から内部に進むに従い低減する傾向を示している。一方、内側のサンプルCでは表面から内部に進むに従い、全網目密度が低減する傾向にあることがわかる。

これらのサンプルの比較から、外側の表面に近いゴム材の全網目密度が内側に位置するサンプルの2～2.5倍程度の値を示していることがわかる。そして、外側の表面に近い部分のゴム材のサンプルは、内側の表面から深い部分のゴム材サンプルよりも、より多くの紫外線やオゾンなどに曝される条件にあることを考慮すると、全網目密度が比較的高い値を示す場合、ゴム材が劣化していると考えられる。

よって、当該のゴム支承のゴム材は表面から2mm程度までは環境的な要因、例えば紫外線やオゾンの影響を受けることにより劣化が進行しているが、2mmより深い部分のゴム材は、材料としての健全性を保っていることが考えられる。

図3.7および図3.8は、内側に位置するゴム材のサンプルCに関する破断伸びと破断応力を示したものである。これらの図から、サンプル表面から1～3mmの位置では、伸び・破断応力ともに比較的低い値となっているが、表面からの距離が増加し、特に3mm以上の位置では破断伸び・破断応力のいずれも一定の値に近付く傾向を示していることがわかる。

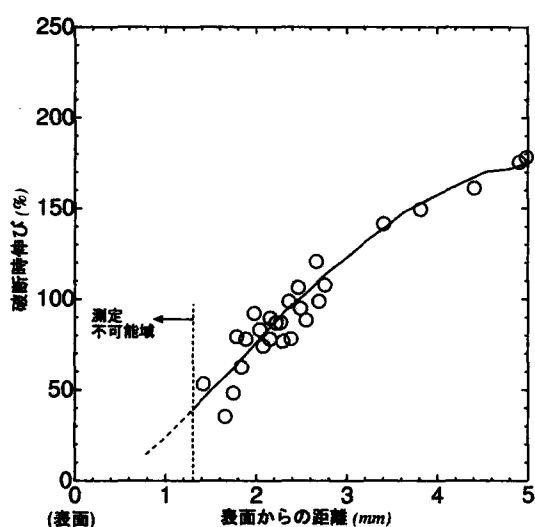


図3.7 表面から内部へのマイクロ破断伸び
(サンプルC) ⁴⁾

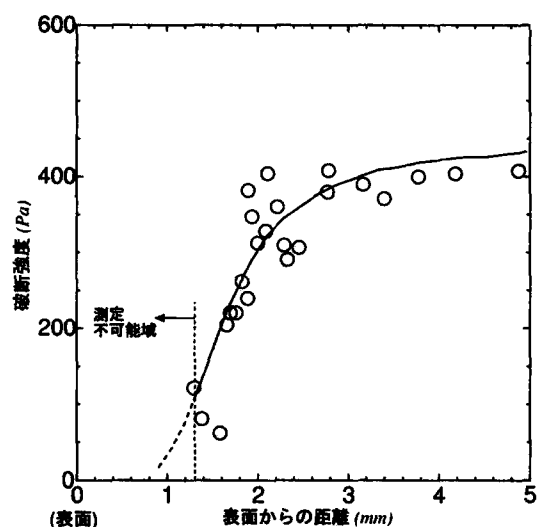


図3.8 表面から内部へのマイクロ破断応力
(サンプルC) ⁴⁾

以上の測定事例から、天然ゴムを用いて作成されたゴム支承材は、100年程度の使用期間を経た後にも、かなりの健全性を維持していることが考えられる結果である。よって、現在の天然ゴムに配合する老化を防止する薬剤の配合技術は100年前のそれよりも進歩していることを考えると、特に肉厚のゴム材の場合、その耐久性は現在の土木構造物に用いるために、十分な性能を有していると言える。

特に弾性チェーンの場合、図3.1に見られるように肉厚のゴム材であり、使用環境も紫外線やオゾンの影響が少ない海中の場合が多いことから、使用する天然ゴム材は十分な耐久性を有していると考えられる。

3.4.3 ゴム材の耐摩耗性に関する実験的検討と砂防ダム天端保護材として使用されたゴム材の耐久性について

弾性チェーンを係留索として用いた場合、図3.9に示すように、表面のゴム材が海底面の砂や岩石、あるいはコンクリート製のアンカーブロックに接触し、浮体の動揺によって接触面に大きな摩擦力が作用することが予想される。特に、台風などの荒天時には波浪によって浮体が激しく動揺することになって、海底面や岩石等に対する摺動量が増加し、また、係留索がこれらと激しく衝突する状況が予想される。

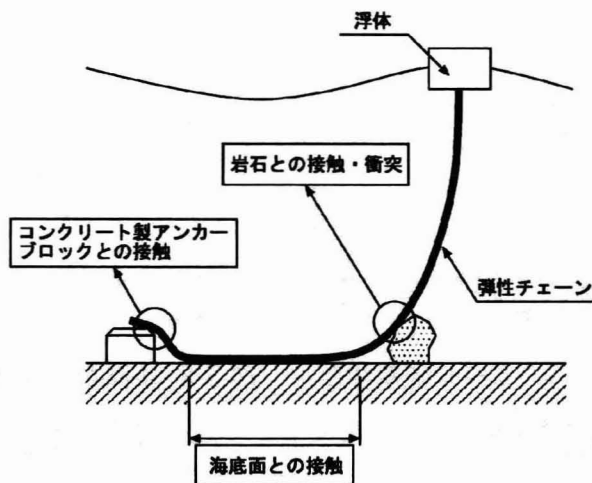


図 3.9 海中の弾性チェーンの予想される摩耗状況

よって、岩石などが衝突する場合に関するゴム材の摩耗についての検討が必要と考えられる。ここでは、ゴム材の耐摩耗性に関する実験的な検討を行うとともに、砂防ダムの天端保護材として用いられているゴム製摩耗防止工に関する調査結果⁶⁾を紹介し、当該の状況におけるゴム材の耐久性について考察を行う。

まず、ゴム材の耐摩耗性に関して実験的な検討について述べる。図 3.10 は、コンクリートすり減り抵抗試験機 (ASTM-C418) を用いてゴム材、塩化ビニル、鋼 (SS400) の 3 種類の材料について重量の減少量と重量減量速度を比較したものである。実験は鋼球を入れたドラムに試験体を取り付け、ドラムを回転させることにより鋼球を試験体に接触させて行った。試験体の摩耗量は実験前後の試験体の重量を測定し、摩耗速度は試験体の重量減少量と表面積から摩耗によって失われた高さとドラムを回転させた時間から求めた。なお、ドラムの回転時間は 120 分とした。この実験結果より、一般的な鋼では重量減少量および減量速度共に他の 2 種類の材料と比較して著しく高い値を示している。

一方、ゴム材と塩化ビニルの双方を比較した場合、ゴム材の重量減少量および減量速度は塩化ビニルの 1/2 の値を示している。この実験結果からゴム材料は鋼と比較して良好な耐摩耗性を示しており、また、合成樹脂である塩化ビニルと比較した場合においても耐摩耗性に優れていることがわかる。

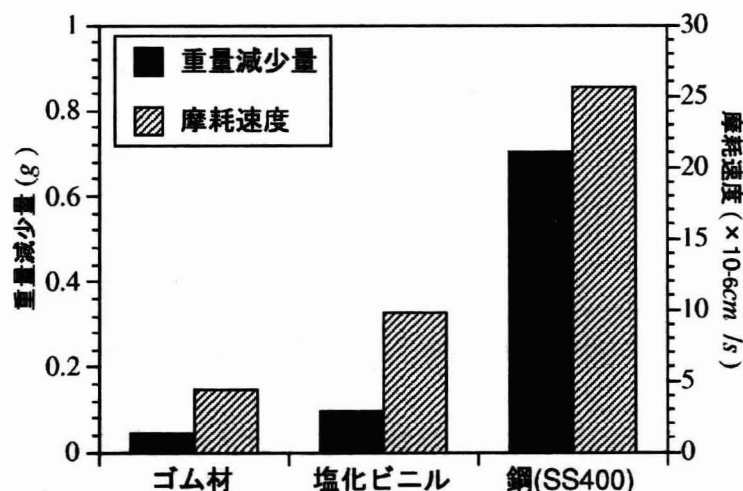


図 3.10 各材料の耐摩耗性に関する比較

ゴム材が塩化ビニルや鋼と比較して摩耗量が相対的に小さくなった原因としては、ゴム材の弾性が作用していることが考えられる。鋼材の摩耗については、山下らにより砂粒子の鋼管への衝突エネルギーによる考察⁵⁾が行われている。これを考慮すると、摩耗量の減少には、材料に物体が衝突したときに生じる衝撃力の緩和効果に関与していると言える。つまり、一般的に弾性の大きな材料は鋼などと比較して衝撃緩和効果が高いことから、ゴム材に鋼球が衝突した際に生じる衝撃力を緩和し、その結果、摩耗量が減少したものと考えられる。

次に、実際の環境において使用された場合の耐摩耗性について検討するために、砂防ダムの天端保護材として使用されているゴム材に関する調査結果を紹介する。

ゴム材を用いた砂防ダムの天端保護材の構造は図 3.11 に示したものである。この保護材はゴム材（天然ゴム）と鉄板を複合した構造を有しており、ゴム材の衝撃緩和特性と鉄板を複合することによる荷重の分散効果によって、砂防ダムのコンクリート面に作用する土石流などによって流下する岩石の衝突時に発生する衝突力を緩和し、ゴム材の耐摩耗性によって砂防ダムの天端面を保護する特徴を有している。

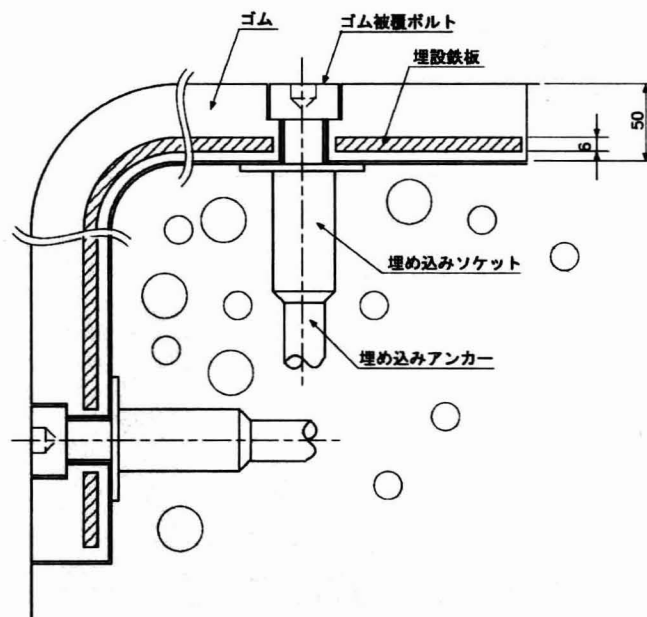


図 3.11 砂防ダム天端保護材の構造

表 3.2 は、参考文献⁶⁾による砂防ダム天端保護材を設置した砂防ダムとコンクリート製天端を持つダムの摩耗量を比較した結果である。なお、調査が実施された河川は鹿児島県桜島の持木川である。この調査結果によると、コンクリートのみの天端では 65.3mm/年の摩耗量であるが、ゴム製の天端保護材を設置した砂防ダムでは、ゴム表面の摩耗量は 0.9mm/年の摩耗量である。

表 3.2 砂防ダム天端保護材の摩耗状況⁵⁾

	磨耗量	土石流発生回数
ゴム製天端保護材	1.8mm	30 回
コンクリートのみ	196mm	
調査期間	1987～1990 年	

当該の河川では、桜島の火山灰の影響により降雨時に土石流が発生しやすい状況にあり、土石流発生時には大量の土砂や岩石によって、砂防ダムの天端表面は摩擦力あるいは岩石の衝突時の衝撃力が作用しやすい環境にあると考えられる。このような荷重によって、コンクリート製のダムの天端面では著しい摩耗が生じているが、ゴム製の天端保護材を敷設した天端ではコンクリートのみの場合の 1/109 の摩耗量で留まっている。このことから、ゴム材はコンクリートなどの材料と比較して耐摩耗性に優れていることがわかる。

以上の調査結果から、海底面において岩石や砂によって係留索表面に摩擦力が作用しやすい状況下に置かれた場合でも、弾性チェーン表面の耐摩耗性が有効に働き、係留索の耐久性を向上させることが可能であると考えられる。

3.4.4 防舷材に使用されたゴム材の耐久性に関する検討

弾性チェーンの使用状況は、一般的には航路標識ブイの係留状況のように海中で使用されることがほとんどであると考えられる。しかしながら、浮体構造物の使用目的によっては

海面付近で使用される場合も考えられる。このような使用状況では、弾性チェーンのゴム材は紫外線、オゾン、あるいは海水飛沫の影響を受けやすい。そこで、ここでは同様な環境の下で使用される防舷材に関する耐久性調査の結果⁷⁾をもとに、弾性チェーンの材料の耐久性について検討する。

調査対象となった防舷材は神戸港内に31年間設置されていたV型防舷材（高さ400mm）である。耐久性の調査に用いる試料は、当該の防舷材の各部から採取した100×150×200mmのブロックから、表面から深さ約60mmまでの範囲で厚さ1～2mmのシート状の形状としたものである。このようにして作成した試料を用いて、引張強さおよび破断時の伸び量、硬度変化、そして膨潤網目密度の変化について測定を行った。なお、試料の採取位置は図3.12に示した部分である。なお、当該の防舷材のゴムは天然ゴムである。

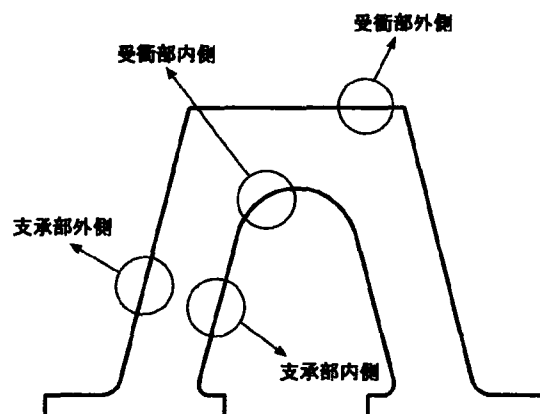


図 3.12 試料の採取位置⁷⁾

まず、深さ方向の引張強さを図3.13に、そして破断時伸び量を図3.14に示す。引張強度については表面に近い1～2mmの部分ではさらに深い層の1/2程度の値で、0.05～0.1MPaとなっているが、2mmを越える深い部分では0.15MPa付近のほぼ一定した値となっていることがわかる。また、破断時の伸び量は上述の引張強度と同様、表面に近い部分では100%を下回る値となりゴム材としての弾性が劣る結果となっているが、15mmより深い部分では250%付近の伸び量となった。

以上の測定結果から、防舷材の表面では紫外線やオゾンなどの影響によって強度や伸び量の低下が見られるが、これらの影響を受けにくい表面から深い部分では表面部分の測定結果と比較して引張強度、伸び量ともに高い値であり、ほぼ様な結果となっていることがわかる。

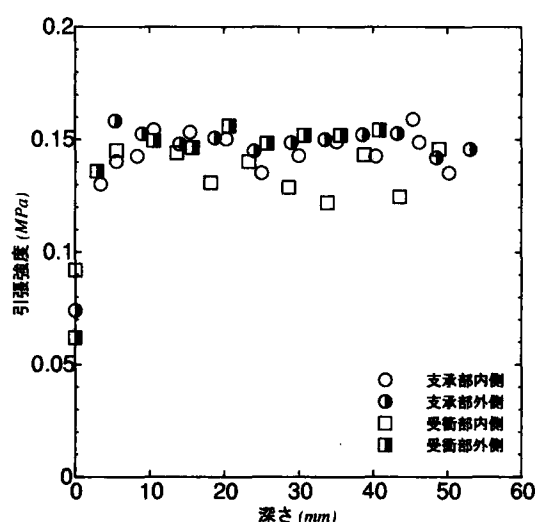


図 3.13 深さ方向の引張強度の変化⁷⁾

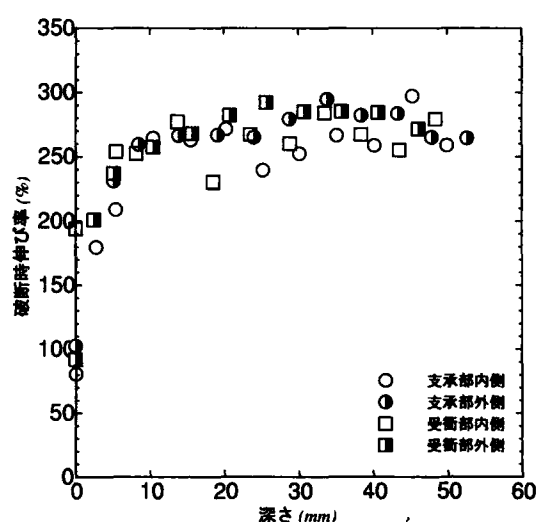


図 3.14 深さ方向の破断時伸び量の変化⁷⁾

図 3.15 は、深さ方向のゴム材の硬度変化を示したものである。この結果から 0~15mm の表面に近い部分では、ゴム材の硬度が他の部分と比較して著しく高い値を示しているが、15mm よりも深い部分では硬度 72° 前後の値を一様に示す結果となっていることが分かる。これは、表面部ではゴム材がオゾンの影響によって硬化する現象により硬度の上昇を示したが、オゾンの影響を受けにくい表面から深い部分では硬度の値は一樣であり、比較的健全性を保っていると考えられる。

次に、図 3.16 は深さ方向の膨潤網目密度の変化を示したものである。膨潤網目密度の測定は採取した試料から幅 5mm、長さ 20mm の試験片を作成し、トルエンに温度 20℃で 72 時間浸漬し、試験前後に測定した試験片の重量を式 (3.1) ~ (3.3) の修正 Floy-Rehener の式⁸⁾に代入して求められたものである⁷⁾。

$$\nu = -\frac{g}{V} \cdot \frac{\ln(1-V_R) + \mu V_R^2}{g^{2/3} V_R^{1/3} - V_R/2} \quad (3.1)$$

$$q_v = \frac{(W_2 - W_1)/\rho}{(W_3 - W_1)/\rho} = \frac{1}{V_R} \quad (3.2)$$

$$g = \frac{W_3 - W_1'}{W_0 - W_1} \quad (3.3)$$

ここに、 ν ：膨潤網目密度、 V ：膨潤溶媒（トルエン）の分子量、 V_R ：試験片中のゴムの容積分率、 μ ：試料ゴムと膨潤溶媒の相互作用係数(0.393)、 q_v ：容積膨張比、 W_0, W_1 ：試験片の空气中・溶媒中での重量、 W_1', W_2, W_3 ：膨潤試験片の溶媒中・空气中・乾燥後の重量、 ρ ：膨潤溶媒の密度、 g ：膨潤前試験片のゲルゴム容積分率である。

図 3.16 の縦軸は、防舷材の各部位から採取したブロックの各深さにおける試料の膨潤網目密度 ν と、最も深い位置から作成した試料を用いて測定した膨潤網目密度 ν_0 の比をとったものである。この図から、防舷材のいずれの部位においても、膨潤網目密度が増大して行く傾向にあることがわかる。また、防舷材の部位との関連を見ると、防舷材の圧縮変位時に最も伸び変位が現れる支柱部や受衝部の内側といった部位における膨潤網目密度の増大が著しく、その値は最も深い部分で測定された値の 50 倍に達している部分も存在することが分かる。これは、表面に近い部分では、先のゴム支承の全網目密度の測定事例でも述べたように、紫外線やオゾンによってゴムの架橋点が増加することにより膨潤網目密度が増大したことが考えられる。また、支柱部や受衝部の内側では伸び変位が生じることによる発熱がゴム分子の架橋点を増加させ、膨潤網目密度が増大したものと考えられる。しかしながら、これらの膨潤網目密度の増大は、表面から 30mm より深い部分では生じていないことから、内部のゴムの健全性は保たれていると考えられる。

また、膨潤網目密度と硬度変化を比較すると、表面付近の硬度が比較的大きな値を示している部分では、膨潤網目密度も大きな値を示していることが分かる。これは、架橋点の数が増加するとゴム材が硬くなる、すなわち変形が生じにくくなることを示している。以上

のことからゴム材の硬度を測定することによって紫外線やオゾンの作用によるゴム材の劣化の指標が得られることを示唆している。

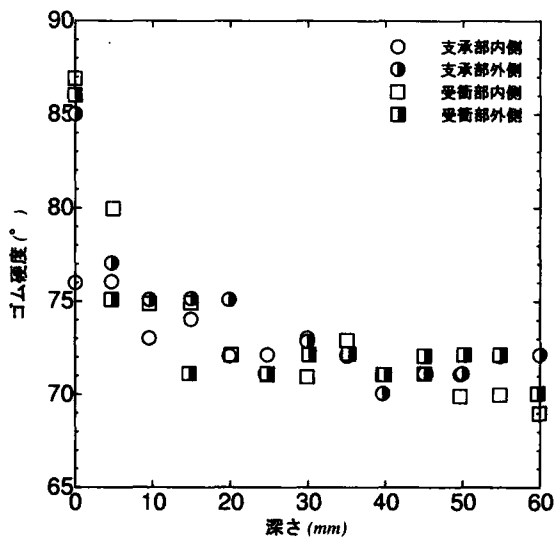


図 3.15 深さ方向の硬度変化⁷⁾

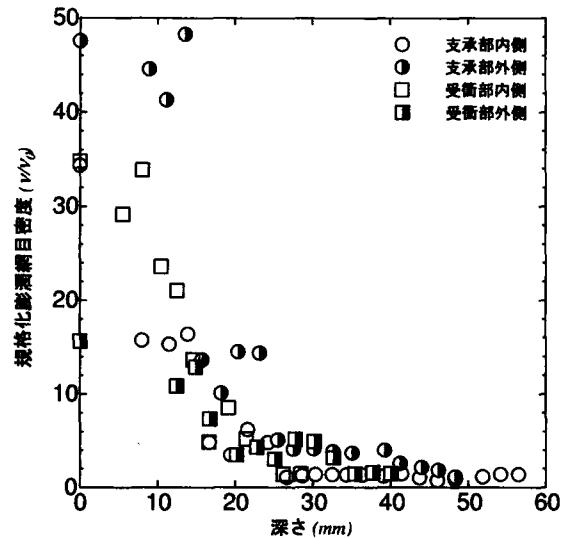


図 3.16 深さ方向の膨潤網目密度の変化⁷⁾

前述のように、ゴム材の膨潤網目密度および硬度、引張強度を比較した結果では、ゴム材の経時変化は表面から深さ 30mm まで進行しているが、強度に関して大きな低下を示している部分は表面から 5mm 以内の深さに留まっている。膨潤網目密度と引張強度の関連を考えると、ゴム材の分子は長期間の载荷等の影響によって変化が生じているが、これが引張強度に対して影響を与えているのは表面付近に限られていると考えられる。図 3.13 から 3.16 を比較してわかるように、規格化膨潤網目密度 v/v_0 の値が概ね 30 を超える深さにおいて引張強度の低下が見られ、その深さは 5mm を超えていない。調査対象とした防舷材の設置期間は 31 年間であることを考慮すると、膨潤網目密度の増加によってゴム材の引張強度の低下が表面から深い部分に進行するにはさらに時間を要すると考えられる。

以上のことから、弾性チェーンが空気中のオゾンおよび紫外線、海水飛沫の影響を受ける場所に設置された場合でも、外面を被覆しているゴム材は通常の鋼製チェーンと比べて長期間にわたる使用が可能と考えられる。

3.5 結言

以上の各ゴム材の特性比較, および実際に土木構造物に適用されたゴム材の耐久性に関する資料を挙げたが, これらから以下のことが言える。

- (1) 天然ゴムは, 各種合成ゴムと比べて強度・伸び等の物理的特性に優れているとされている。これは, 天然ゴムのポリマーの結晶性が合成ゴムよりも大きいことによる。また, 合成ゴムに天然ゴムと同等の力学的強度を与えるためには多くの補強剤を必要とする。加えて, 一般的に合成ゴムのコストは天然ゴムと比べて高価となる傾向がある。よって, 力学的特性および経済性の双方から弾性チェーンのような大変形・荷重に対応する用途には天然ゴムの使用が妥当と考えられる。
- (2) 橋脚支承材および防舷材に使用された天然ゴムの状況から, 天然ゴムは载荷やそれによる変位を受けた場合でも, その材料の強度などは長期間に渡り維持されるといえる。
- (3) 鋼・塩化ビニル・天然ゴムの摩耗量を比較した場合, ゴム材の摩耗量が最も少なくなる。これは, ゴム材の弾性により摩耗の原因となる材料の衝突に対して衝撃力の緩和効果が関与したことによると考えられる。
- (4) 砂防ダムの天端保護材として天然ゴムを用いた場合, コンクリートのみの天端と比較して摩耗量が少なくなる。これは(3)と同様, ゴム材の弾性により, 土石流で流された岩石が砂防ダムの天端面に衝突した際の衝撃力が緩和されたことによると考えられる。

よって, ゴム材は弾性が大きく, 衝撃力の緩和効果を有していることから, 耐摩耗性に関してもこの性質が有効に作用することが考えられる。また, 強度の面では, 天然ゴムは合成ゴムと比較して結晶性が大きく, 大きな強度を得やすいという特徴がある。加えて, 天然ゴムは, 実績の面でも大きな荷重が作用する場所での適用が多い。

以上の面から, 弾性チェーンの主要な材料として天然ゴムを用いることは, 係留策の摩耗防止や耐久性の面で有効と考えられる。

参考文献

- 1) 社団法人 全国漁港協会：漁港の防波堤・けい船岸等の設計指針と計算例 平成4年度改定版, p. p. 663～719, 1992.
- 2) 日本ゴム協会：ゴム技術の基礎, 1992.
- 3) 小松公栄：ゴムの超理解法, ポスティコーポレーション, 1997.
- 4) ゴム技術フォーラム：「ゴム材料の土木・海洋用途をさぐる」－「ゴム材料のマリン用途をさぐる」調査委員会報告書, p. p. 69～70, 1997.
- 5) 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・染矢武彦・佐藤光一・仮屋園義久：粒径・管経の効果に着目した漂砂による鋼管の摩耗特性, 海岸工学論文集, 第39巻, p. p. 481～485, 1992
- 6) 末吉正志・亀江幸二・柿元俊弘・鈴木 宏：持木川における水通し天端保護工の耐久性について, 平成3年度砂防学会研究発表会概要集, p. p. 328～331, 1993.
- 7) Nishimoto, Y. Terashita, F. Ikoma, N. Mifune, N.: Evaluation for degradation of rubber buffer materials along depth direction, 3rd International Symposium on Weatherability, p.p.212-221, 1997.
- 8) 日本ゴム協会：ゴム試験法 新版, p. p. 209～212, 1988.

第4章 弾性チェーンの静的載荷特性と衝撃力緩和効果に関する検討

4.1 緒言

鋼製チェーン等で係留された小型の浮体構造物では、台風あるいは低気圧などによって生じた比較的大きな波浪の作用で係留索が破断する被災が多いことは、港湾における浮体構造物の被災事例の調査結果において述べた。

特に鋼製チェーンを使用して構造物を係留している場合、チェーンの自重によりそのリンク間が接触し、浮体の動揺によって接触した部分が摺動することで金属が摩耗する。このことによって係留索の強度が低下し、このような状態にある係留索に対して波浪による浮体動揺によって衝撃的な張力が作用することで係留索が破断に至ると考えられる。

そこで、係留索の破断を防止する方法として、鋼製チェーンをゴム材に埋設することでリンク間の摺動を抑え、そして、チェーンが砂や岩等に直接接触することを防ぐことでチェーンの摩耗を防止し、加えて、チェーンリンク間にゴム材を充填することにより、ゴム材の変位によって衝撃的な張力を緩和する構造である「弾性チェーン」の使用を提案した。

弾性チェーンの主要材料であるゴム材は、古くから橋梁の支承材などの土木資材として利用されており、100年程度前に設置された支承材のゴム材は、現在でもかなりの健全性を有していることを示した。また、港湾で用いられる防舷材に使用されたゴム材についても、長期間の紫外線曝露や Splash Zone における海水の影響を受けにくいことを示した。

以上のことから、弾性チェーンの材料としてゴム材を用いることに問題がないことを示した。そこで、この章では、弾性チェーンの機能に関しての検討を進めるものとし、弾性チェーンの静的載荷特性および衝撃緩和効果について実験的に検討を行う。

4.2 弾性チェーンの機能に関する特徴

弾性チェーンは、図 4.1 に示すようにゴム材に鋼製チェーンを埋設した構造となっている。ゴム材は、鋼製チェーンの外側に位置する外面を被覆するゴムと、鋼製チェーンのリンク間を弛緩させて埋設させた場合にリンク間に充填されるゴム材の 2 種類の部分に分けられる。

これらのゴム材は、異なった機能を担っており、それぞれ、

- (1) 外面を被覆するゴム－係留索の摩耗防止機能、リンク間充填ゴムの拘束
- (2) リンク間に充填されるゴム－衝撃張力の緩和機能

と言った機能を持っている。

まず、外面を被覆するゴム材の摩耗防止は、先の章で示したゴム材の耐摩耗性によって機能する。係留索は海面のブイの動きに追従して運動し、係留索の表面は海底面の砂や岩に接触する。係留索の外面をゴム材で被覆した場合、海底面の砂等が、外面に接触したときにゴム材の反発弾性によって摩耗が防止される。

次に、リンク間に充填されたゴム材は弾性チェーンの衝撃張力の緩和効果に寄与する。通常の鋼製チェーンによる係留索では、ブイの浮力と係留索の自重によってリンク間が常に接触した状態となっている。このような状態で、ブイが波浪により短時間で動揺すると、係留索に衝撃的な張力を発生させることが考えられる。

一方、弾性チェーンではリンク間を弛緩した状態にして、そこにゴム材を充填しているため、係留索に張力が作用したときにリンク間のゴム材が圧縮変位を起こし、係留索が伸び変位することになる（図 4.2）。この変位によって、係留索のバネ材としての効果が向上し、その結果、衝撃的な張力の緩和に効果を及ぼすと考えられる。

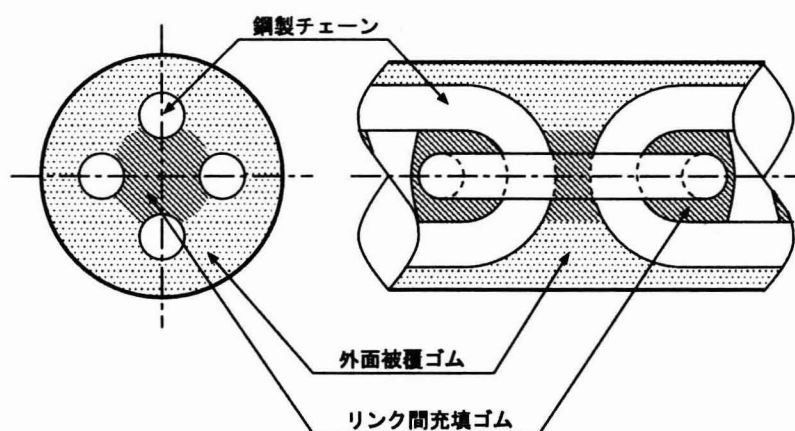


図 4.1 弾性チェーンの断面

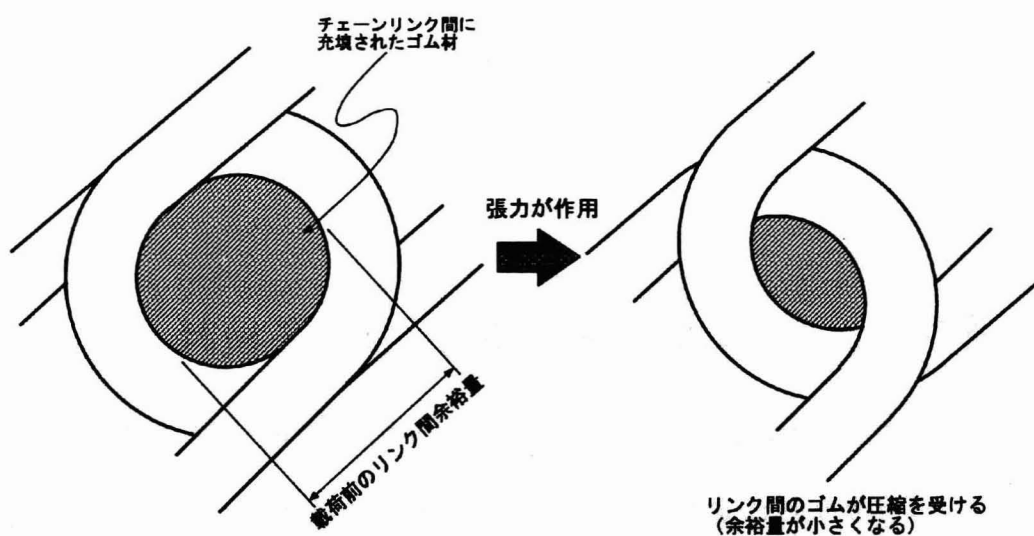


図 4.2 リンク間に充填されたゴム材の機能

図 4.3 は弾性チェーンと鋼製チェーンの張力と伸びの関係を比較したものである。この図から、鋼製チェーンと同様の張力を作用させた場合、その変位量に著しい相違が現れることが確認できる。図 4.3 の弾性チェーンの特性において、張力に対する変位量が多い部分では、リンク間ゴム材の圧縮の影響が現れている領域であり、張力を更に増加させた領域では、鋼製チェーンと類似した張力-変位特性を示すようになる。これは、張力によってリンク間のゴムが圧縮変位を生じ、これが限界まで進行することによってチェーンリンク間が接触した状態に近付くためである。

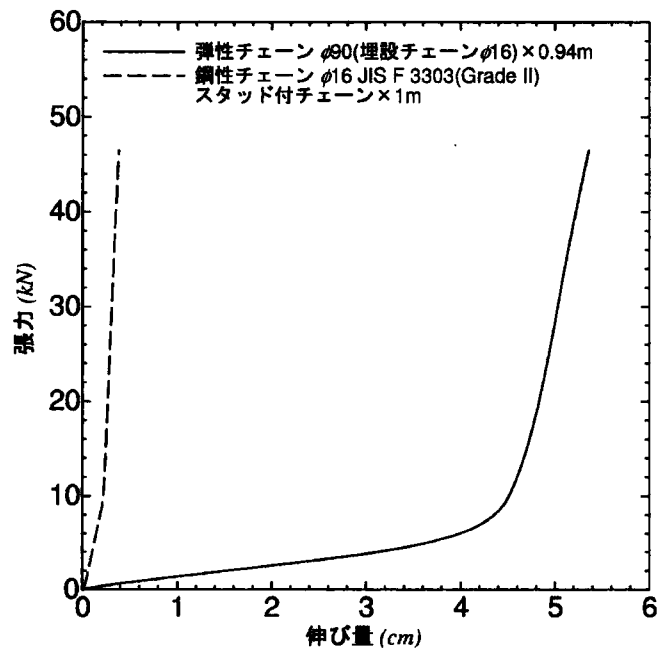


図 4.3 弾性チェーンと鋼製チェーンの張力-変位特性の比較

4.3 弾性チェーンの静的载荷特性に関する検討

4.3.1 チェーンリンク間の余裕量と静的载荷特性に関する検討

弾性チェーンに埋設された鋼製チェーンのリンク間にゴム材を充填することによって、弾性チェーンに張力が作用したときにリンク間のゴム材が圧縮されて弾性チェーンに変位が生じることは先に述べた。

ここでチェーンリンク間の距離を余裕量 a と定義すると、 a の値を変化させることによって弾性チェーンの張力と変位量の関係、すなわち、バネ特性が変化する。図 4.4 は 2 種類の異なる余裕量の弾性チェーンの張力と変位量の関係を比較したものである。この図から、余裕量を変化させることによって異なったバネ特性を有する弾性チェーンが製作できることを示唆している。

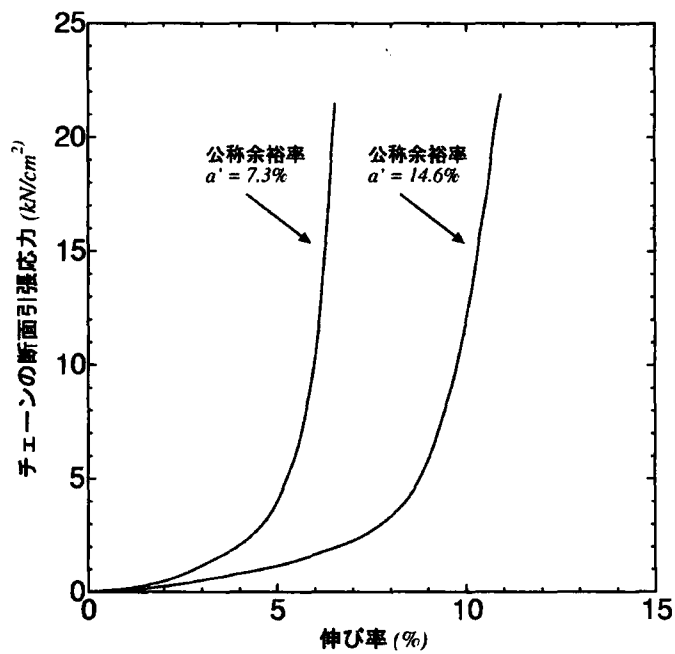


図 4.4 余裕量の違いによる弾性チェーンのバネ特性の変化

なお，チェーンリンク間の余裕量 a は，弾性チェーンの製作時に各リンク間でばらつきを生じることが考えられる．このため，以下では，余裕量を鋼製チェーン埋設部の長さで一般化した公称余裕率 a' という値で示すこととする．公称余裕率 a' (%)は，鋼製チェーンの埋設部の長さを l ，埋設する鋼製チェーンをリンク間のすき間無く伸ばした状態の鋼製チェーンの長さを l_{\max} ，リンク間のすき間を最大とした状態の鋼製チェーンの長さを l_{\min} とすると，

$$a' = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{l} \times 100 \quad (4.1)$$

として求めるものとする． l_{\max} および l_{\min} の各長さは図 4.5 に示した各部の値である．

また，弾性チェーンのバネ特性を任意に設定したい場合には，実験的に求めたゴム材の圧縮率（図 4.6）と式 (4.1) の公称余裕率 a' を用いて以下のようにバネ特性を推定することができる．

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= a' g(\sigma_c) \\ T &= \sigma_c A_c \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

ここに、 Δl ：弾性チェーンの推定伸び量、 $g(\sigma_c)$ ：埋設チェーン断面応力 σ_c に対するゴムの圧縮率、 T ：張力、 A_c ：埋設チェーンの断面積である。

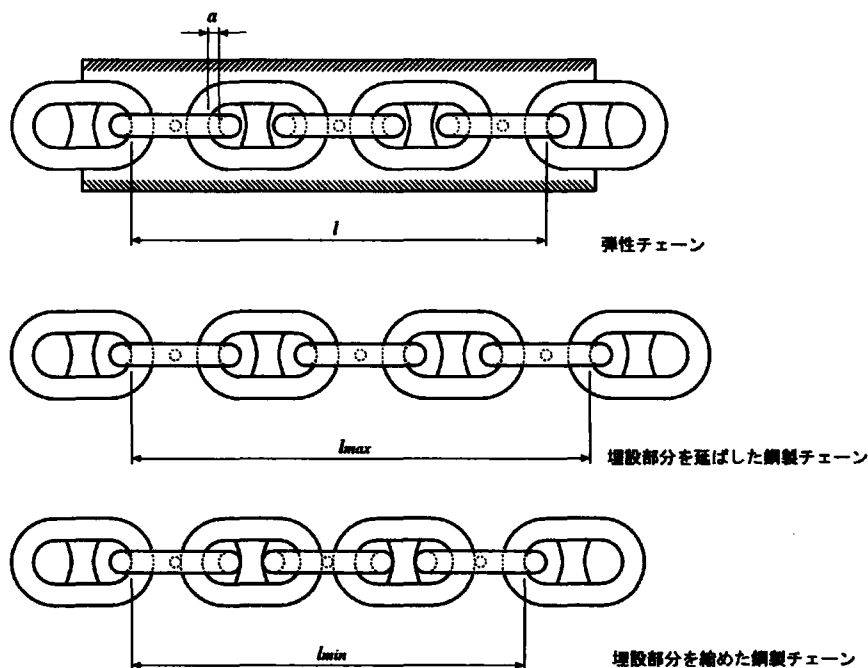


図 4.5 公称余裕率を求めるために用いるチェーンの長さゴム材の圧縮率

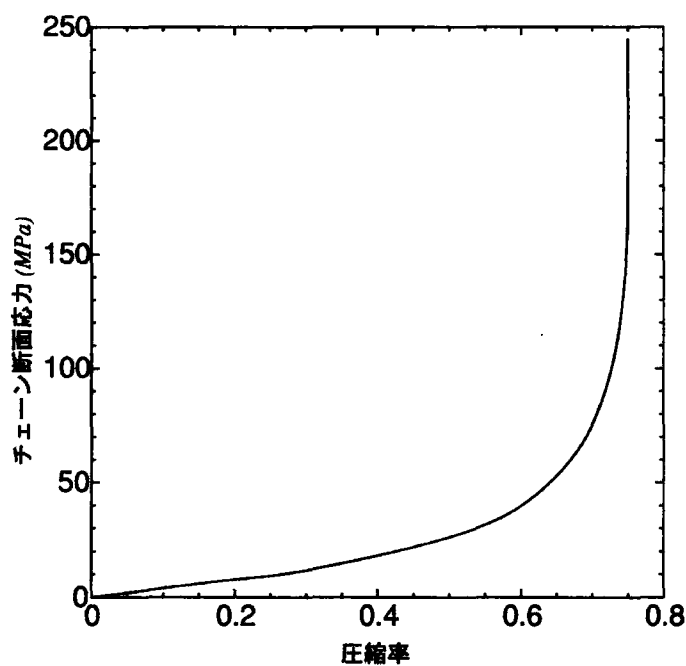


図 4.6 ゴム材の圧縮率

図 4.8 は、式 (4.2) を用いて推定したバネ特性と、その推定に用いた長さの鋼製チェーンおよびチェーン埋設部の長さで製作した弾性チェーンの供試体のバネ特性を比較したものである。推定バネ特性と実際の特性の比較を行う弾性チェーンの形状を図 4.7 に示す。この弾性チェーンは直径 $\phi 150\text{mm}$ 、長さ 4m の外形で、埋設チェーンは $\phi 24$ スタッド付チェーン (JIS F 3303 2 種) である。

この図から、推定値は実際の弾性チェーンと比較して張力に対する伸び量を小さく推定する、すなわち、剛性を高く見積もる傾向にある。衝撃張力の緩和効果を考慮した場合、一般に、剛性が高い弾性チェーンでは衝撃緩和効果が低くなることが考えられるため、上述の方法では弾性チェーンのバネ特性が安全側に見積もられると言える。

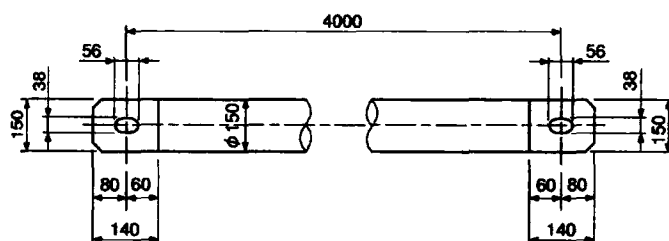


図 4.7 推定バネ特性と実際の特性の比較を行う弾性チェーン

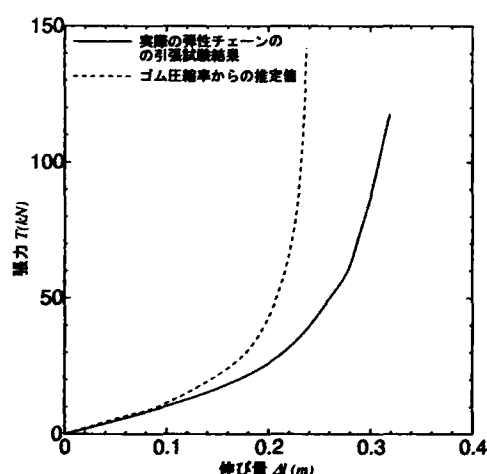


図 4.8 推定したバネ特性と実際の弾性チェーンのバネ特性の比較

4.3.2 静的载荷特性に関するゴム材の拘束の効果

弾性チェーンに張力が作用したとき、ゴム材に埋設した鋼製チェーンリンク間のゴム材が圧縮されることによって、弾性チェーンは変位を生じる。しかし、弾性チェーンに対して繰り返し張力が作用する場合、あるいは非常に大きな張力が一時的に作用したときにチェーンリンク間のゴム材が破壊される懸念が存在する。そこで、ここではリンク間のゴム材の変位

について実験的な検討を行った結果を示す¹⁾。

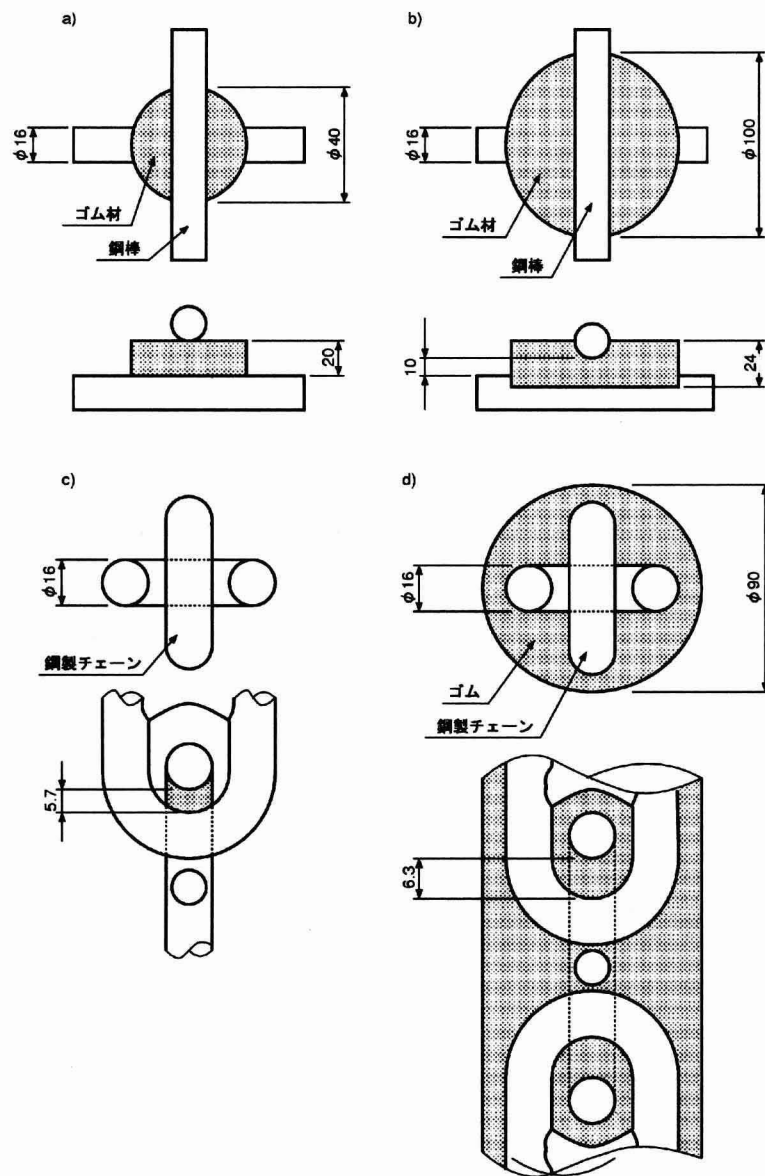


図 4.9 ゴム材の拘束状態を変えた試験体

実験には図 4.9 に示した 4 種類の試験体を用いた。図 4.9a) の試験体は円盤状のゴム材 (直径 40mm, 厚さ 20mm) の表裏に金属棒 ($\phi 16\text{mm}$) を直交させた状態としたもの、b) は円盤状のゴム材 (直径 100mm, 厚さ 24mm) の表裏に金属棒を直交させた状態で加硫接着を施したもので、金属棒の中心間の距離は 24mm, 圧縮を受けるゴム材の最小厚さは 10mm である。また、

c) は線径 $\phi 16$ のチェーンリンク間の受圧面積部にのみゴム材を加硫接着したもの、そして、
d) は c) と同じ線径のチェーンをゴム材に埋設し、弾性チェーンの構造 (外径 $\phi 70$) としたものである。

図 4.9 に示した試験体に圧縮荷重を載荷した結果を示したものが図 4.10 である。なお、図の縦軸の圧縮応力は、鋼棒あるいはチェーン交差部のゴム材に対する投影面積から求めた値である。この試験結果より、金属棒の間にゴム材を単純に配置しただけの試験体である a) の結果では、他の試験体と比較して圧縮応力が低く、さらに荷重を載荷した場合ゴム材が破断する結果となった。これは、図 4.11a) に示したように圧縮荷重を作用させた場合にゴム材が金属棒の間から外側に流出してしまうために、ゴム材の高さが減少することが原因と考えられる。弾性チェーンにおいて、この試験体と同様にチェーンリンク間のゴム材を拘束せず使用了場合、張力が作用した直後にリンク間のゴム材が過圧縮の状態となる懸念が存在する。このため、リンク間にゴム材を配置したとしても、小さい張力で鋼製チェーンと同等の特性となることが考えられる。

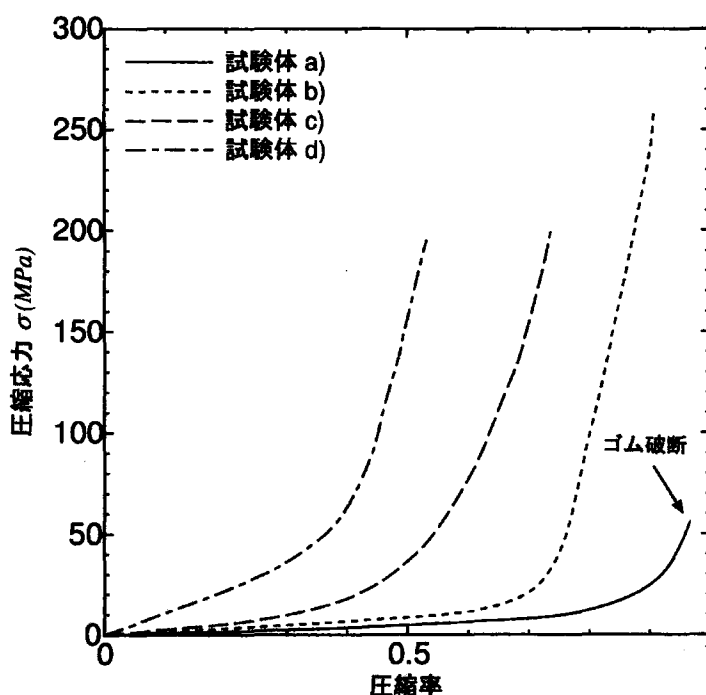


図 4.10 ゴム材の拘束状態による圧縮特性の比較

一方、金属棒とゴム材を加硫接着した図 4. 9b) の試験体では圧縮荷重を作用させた場合でも、加硫接着によってゴム材の変形を拘束することによってゴム材の流出が生じにくくなることで金属棒の間のゴム材の厚さの減少量が少なくなる。この結果、図 4. 9a) の試験体が破断したときと同等の圧縮荷重を載荷した場合でも、図 4. 9b) の試験体には破断が生じない結果となった。また、圧縮時の剛性を比較すると、図 4. 9b) の試験体は、例えば 2.5kN/cm^2 の圧縮荷重を載荷させたときの圧縮率は、a) の試験体のおよそ 80% の値となり、剛性が高くなっていることがわかる。

また、チェーンリンク間にのみゴム材を加硫接着した図 4. 9c) の試験体と弾性チェーンの断面構造と同様とした d) の試験体では、d) の試験体における圧縮荷重 7kN/cm^2 付近の圧縮率を比較すると c) のおよそ 80% となり、圧縮時の剛性が高くなっていることがわかる。これは、図 4. 11c) に示したように、チェーンリンク間のゴム材の側面をさらにゴム材で被覆することによって、リンク間のゴム材が圧縮されたときに生じる側方へのゴム材の流出が生じにくくなるためと考えられる。

以上の実験結果により、図 4. 9 の試験体では金属棒と加硫接着し、ゴム材を受圧部分から流出しにくくすることによって金属棒にはさまれた部分のゴム材の破損を防ぐことができることがわかる。また、ゴム材を加硫接着で拘束し、さらにチェーンリンク間のゴム材をさらにゴム材で被覆してその変位を拘束することによりリンク間のゴム材が圧縮されるときに剛性が高くなることが分かる。

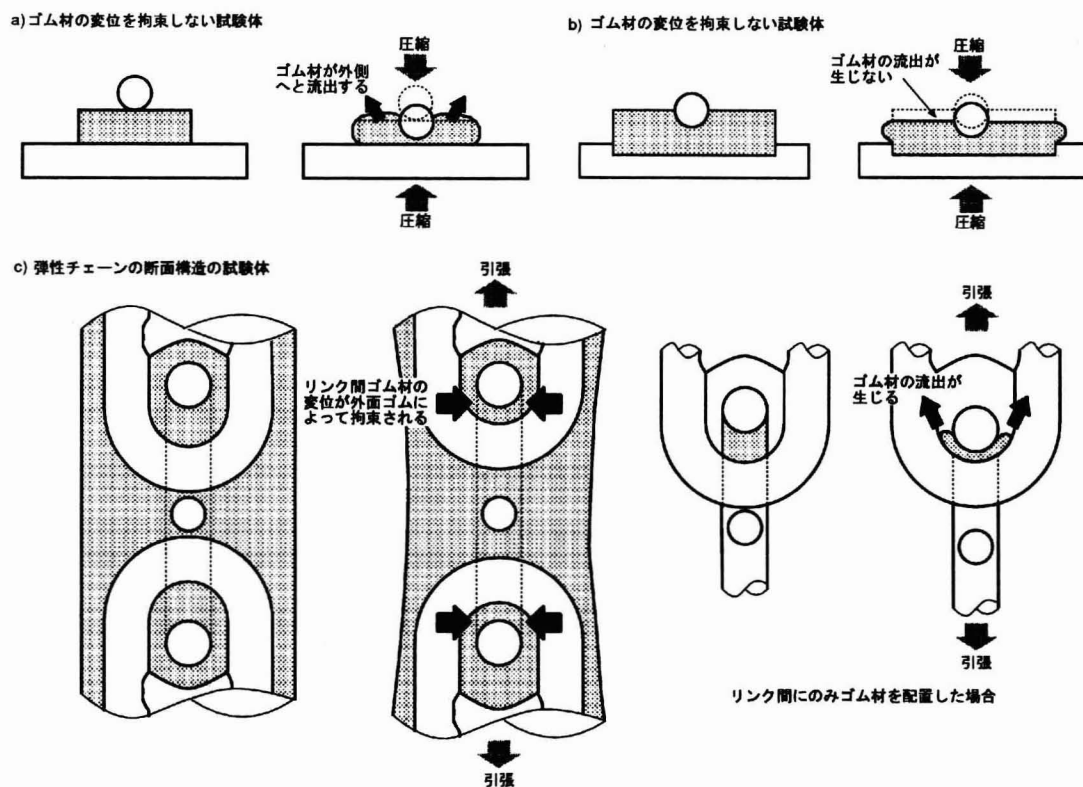


図 4.11 ゴム材の拘束状態による変形状態の相違

よって、弾性チェーンの鋼製チェーンリンク間のゴム材の張力作用時における破損は、ゴム材を鋼製チェーンと加硫接着することと、リンク間のゴム材をさらにゴム材で被覆することによって防止することができると言える。また、チェーンリンク間のゴム材を拘束することで弾性チェーンの剛性が向上し、このため、比較的大きな張力においてもチェーンリンク間が接触しにくくなり、ゴム材による弾性が広い荷重域で得ることができると考えられる。

4.4 弾性チェーンの衝撃力緩和効果に関する検討

4.4.1 ゴム材の一般的な衝撃緩和効果について

係留索の破断を防止する方法として、ゴム材の衝撃緩和効果を利用することは先に述べた。ゴム材の衝撃緩和効果は一般的なゴム材に関する知見であり、この性質は様々な用途に利用

されている。一般にゴム材を緩衝材として利用する場合、初期に荷重を载荷した状態で用いる事例は少ないと言えるが、係留索としての利用を考えた場合、浮体を弛緩係留したとき、係留索にはその自重によって初期張力が作用している。

ここでは、ゴム材に対して初期荷重を载荷した場合を含めて衝撃実験を行い、ゴム材の衝撃緩和効果について実験的に確認を行う。また、ゴム材の変形を拘束することによって、バネ特性が変化するとともに過圧縮による破損を防ぐことができると述べたが、ここでは、変形を拘束したゴム材の衝撃力の緩和特性について調べる²⁾。

図 4. 12 は、衝撃実験に用いた試験体の形状である。試験体は、外径φ160mm、内径φ50mm、高さ 50mm の円筒形とした。試験体は3種類とし、これらの構造は硬度 50 度および 65 度の充実ゴムとしたもの (Type A, B) と、ゴム材に合成繊維の織布を積層して埋設したもの (Type C) とした。Type C の試験体に用いた合成繊維織布は、ゴム材の変形を拘束し、剛性を増加させることを目的としたものである。なお、ゴム材を用いた試験体と比較するために鉄板に直接载荷する実験も行った。

実験装置は、図 4. 13 に示した重錘落下式の衝撃実験装置を用いて行った。これは、試験体上面に重錘を落下・衝突させることにより衝撃荷重を载荷するものである。重錘の質量は 130kg のものを用い、落下高さは 2m とした。発生荷重の測定は、試験体直下に設置したロードセルを用いて行った。

実験ケースは、それぞれの試験体に対して初期圧縮応力を与えない場合 ($\sigma_0 = 0$) と初期圧縮応力を与えた場合 ($\sigma_0 = 0.25\text{kN/cm}^2$) の2種類について行った。初期圧縮応力は、所定の圧縮応力が作用する変位量 (表 4. 1) を加えた後、鋼板とボルトによって変位を保持することで行った。初期圧縮応力を作用させたケースは、弾性チェーンに繋いだ浮体の浮力によって初期荷重が作用した状態を想定したものであり、その荷重は直径 2.8m、質量 3.3t の係船ブイの余裕浮力に近い値である。

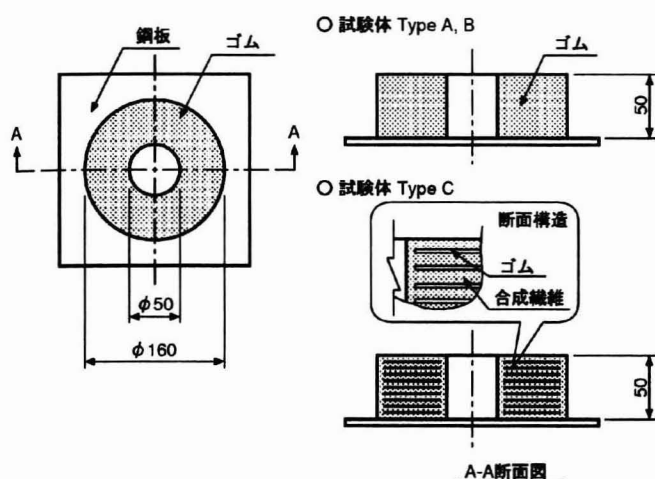


図 4.12 衝撃実験に用いる試験体

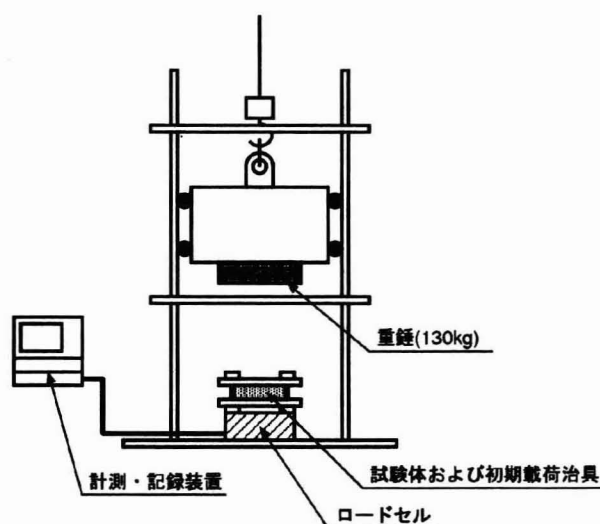


図 4.13 衝撃実験装置

表 4.1 初期圧縮応力付与時の変位量

試験体	充実ゴム (硬度 50 度) Type A	充実ゴム (硬度 50 度) Type B	ゴム織布積層材 Type C
変位量	16mm	10mm	1mm

図 4.14 はそれぞれの試験体における発生荷重の時系列記録を示したもので、そして、表 4.2 は各試験体・実験ケースにおける発生荷重を比較したものである。まず、鉄板のみを用いた場合と各試験体における発生荷重の比 γ_s を比較すると、充実ゴムを用いた試験体 Type A, B では $\sigma_0 = 0$ のとき $\gamma_s = 0.32$, $\sigma_0 = 0.25\text{kN/cm}^2$ のとき $\gamma_s = 0.58$ となりゴムの硬度および初期圧縮応力 σ_0 の有無に関わらず、双方の試験体で同等の衝撃力緩和効果が見られた。一方、ゴム織布積層材の試験体 Type C では、 $\sigma_0 = 0$ の状態では $\gamma_s = 0.55$, $\sigma_0 = 0.25\text{kN/cm}^2$ で $\gamma_s = 0.61$ となり充実ゴムの試験体と比較すると衝撃力の緩和効果は低下していることがわかる。

次に、各試験体における初期圧縮応力 $\sigma_0 = 0$ および 0.25kN/cm^2 それぞれのケースでの発生荷重の増加率 γ_{ab} について比較すると、充実ゴムの試験体 Type A, B では $\gamma_{ab} = 1.80$ とな

り、初期圧縮応力 σ_0 の有無に関しておよそ2倍の発生荷重の増加が見られた。一方、ゴム織布積層材の試験体 Type C では $\gamma_{ab} = 1.12$ となり、充実ゴムの試験体と比較して初期圧縮応力の有無に関する発生荷重の増分が小さいことがわかった。また、 $\sigma_0 = 0.25\text{kN/cm}^2$ における各試験体の鉄板に対する発生荷重比 γ_s を比較すると、初期圧縮応力を与えた場合、試験体 Type A, B および C の間で衝撃緩和効果がほとんど同等になることがわかった。

以上の実験結果では、変形を拘束しない充実ゴムでは初期圧縮応力の有無によって衝撃力の緩和効果が大きく変化するが変形を拘束したゴム材では衝撃力緩和効果の変化は小さく、また、初期圧縮応力が与えられた場合には変形の拘束の有無に関わらず、衝撃緩和効果はほぼ同等となる傾向が見られた。

表 4.2 各試験体における発生荷重の比較

試験体	発生荷重 (kN)		鉄板に対する発生荷重比 γ_s		σ_0 の有無に関する発生荷重比 $\gamma_{ab} = P_b/P_a$
	P_a	P_b	$\sigma_0=0$	$\sigma_0=0.25\text{kN/cm}^2$	
充実ゴム (硬度 50 度) Type A	100	180	0.32	0.58	1.80
充実ゴム (硬度 50 度) Type B	100	180	0.32	0.58	1.80
ゴム織布積層材 Type C	170	190	0.55	0.61	1.12
鉄板のみ	310	-	-	-	-

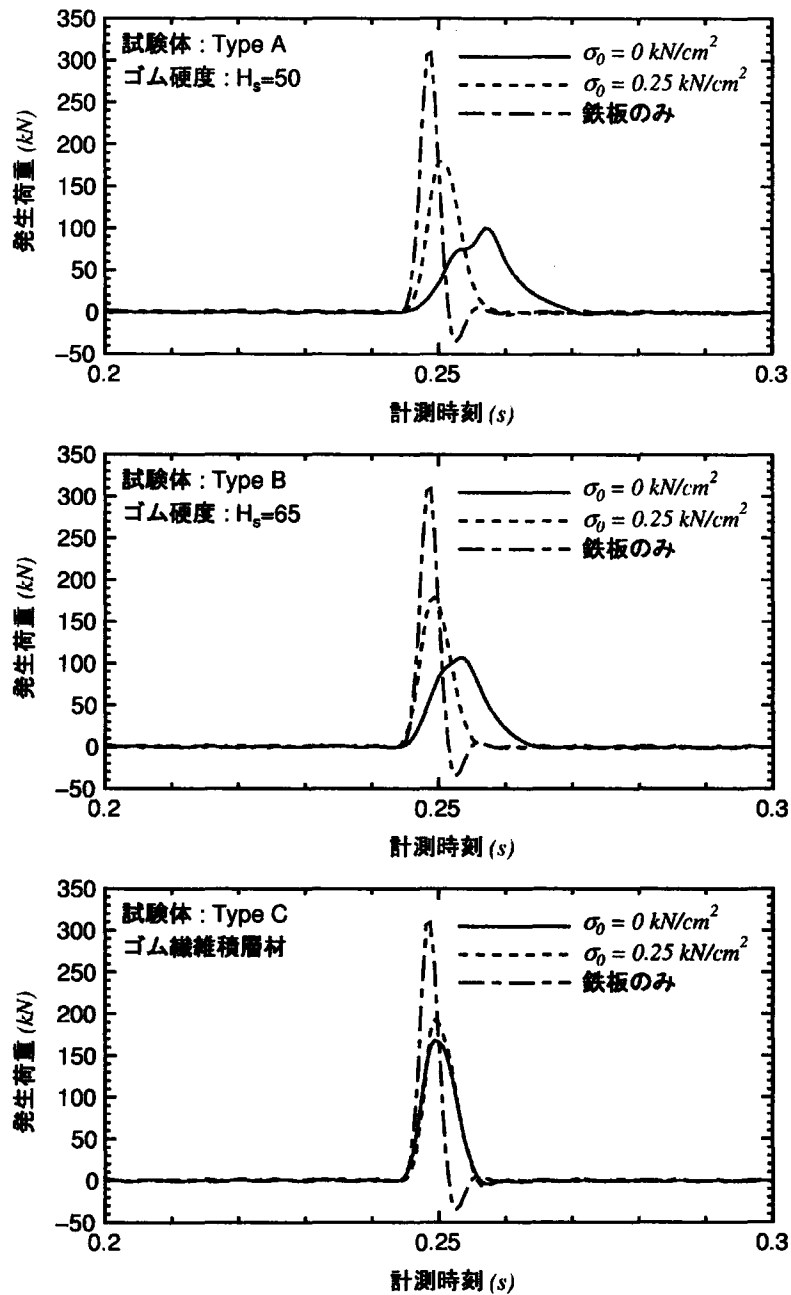


図 4.14 実験結果

実験結果からわかるように、それぞれの試験体の鉄板に対する発生荷重比 γ_s は、初期応力 σ_0 を加えるとほとんど同等の衝撃緩和効果となる。これは、図 4.15 に示すように初期応力 σ_0 を加えることによって圧縮が進み、いずれの試験体でも同様なバネ特性を示すようになるためと考えられる。

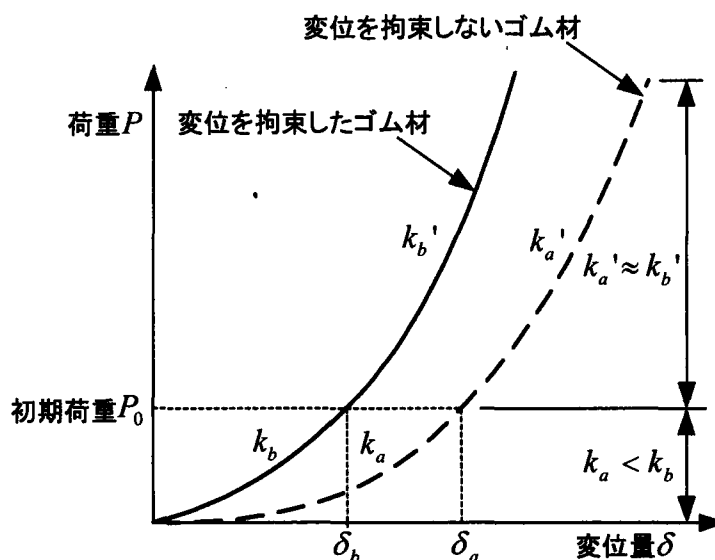


図 4.15 ゴム充実体および変位を拘束したゴムのバネ特性

以上の実験結果と 4.3.2 で示した結果を考慮すると以下のことが言える。すなわち、ゴム材の変形を拘束しない場合、圧縮が進むとゴム材が過圧縮の状態となり破壊に至るが、これを防ぐためには鋼材とゴム材を接着などの方法によって変形を拘束する必要があるが、その一方で、剛性が高くなるため衝撃力の緩和効果が小さくなる可能性がある。しかしながら、初期応力が作用する条件では、変形の拘束の有無に関わらず同様な衝撃緩和効果を得ることができる傾向が見られる。よって、弾性チェーンの埋設チェーンリンク間ゴム材の過圧縮を防ぐために、ゴム材の変形を拘束しても衝撃力の緩和効果は維持されることが考えられる。

4.4.2 模型実験による弾性チェーンの衝撃緩和効果の検討

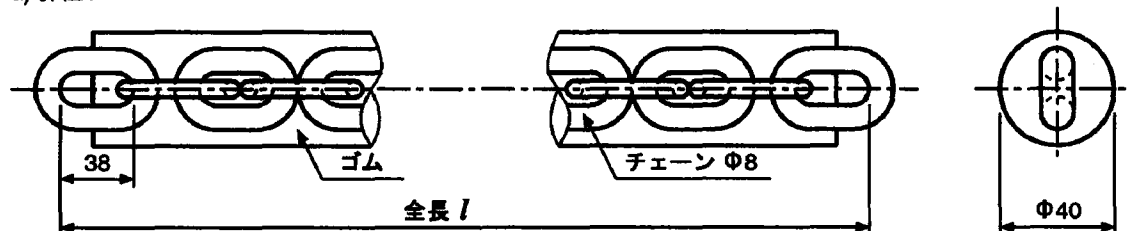
係留索の破断を防止する方法としては、チェーンの摩耗を防止するとともに係留索に作用する衝撃的な張力を緩和することも期待できると考えられる。これは、図 4.3 に示したように、弾性チェーン内部のチェーンリンク間のゴム材が圧縮変位を受けることにより弾性チェーンは鋼製チェーンと比較して同一の作用張力において多くの伸び変位を有しており、このため、弾性チェーンは鋼製チェーンに比べて低いバネ定数となるからである。加えて、弾性

チェーンの主要材料であるゴム材は、衝撃緩和効果を有する弾性体として一般的に知られていることにもよる。

そこで、ここでは、ゴム材と小型のチェーンリンクを使用して弾性チェーンの模型を作成し、ゴム材と鋼製チェーンを複合した索材の衝撃張力緩和効果を検討することを目的として実験を行った。また、弾性チェーンを係留索として用いることを考慮すると、その長さによって衝撃張力の緩和効果がどのように推移するかについて確認する必要がある。よって、弾性チェーンの長さを変えた実験についてもあわせて行うこととした。

まず、試験体は図 4.16 に示した弾性チェーンと鋼製チェーンの 2 種類のものを準備した。弾性チェーンの直径は $\phi 40\text{mm}$ である。また、弾性チェーンに埋設したチェーンの線径は $\phi 8\text{mm}$ のもので耐力荷重 39.2kN 、破断荷重 78.4kN 、使用荷重 15.7kN のものを用いた。なお、弾性チェーンと比較するための鋼製チェーンは、弾性チェーンに埋設したチェーンと同様のものを用いた。また、弾性チェーンおよび鋼製チェーンの試験体の長さはチェーンのリンク数を基準として比較するものとした。

a) 弾性チェーン



b) 鋼製チェーン

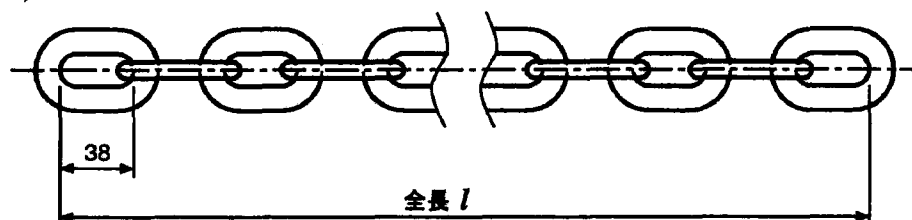


図 4.16 試験体の形状

表 4.1 試験体の種類

試験体種別	記号	チェーンリンク数 n	全長 (mm)
弾性チェーン	RJ08S	7 リンク	220
	RJ08M	9 リンク	295
	RJ08L	15 リンク	498
鋼製チェーン	SC08S	7 リンク	266
	SC08M	9 リンク	342
	SC08L	15 リンク	570

次に、実験装置および実験方法について説明する。実験装置は図 4.17 に示した振り子式衝撃荷重装置を用いて重錘の落下により試験体に衝撃荷重を载荷するものを用いた。なお、重錘質量は 400kg、振り子の支点から重錘重心までの距離は 1.225m である。

また、衝撃荷重の载荷方法は、まず試験体に対して重錘の振り上げ角を $20\sim 60^\circ$ まで 10° ごとに増加させて重錘を落下させ、試験体が破断しなければ破断が生じるまで振り上げ角を 60° として载荷を継続した。なお、载荷時の荷重の計測は試験装置に設置したロードセルを用いた。ロードセルによって計測された荷重はパーソナルコンピュータを用いて記録し、そのサンプリングレートは 10^{-4}s とした。

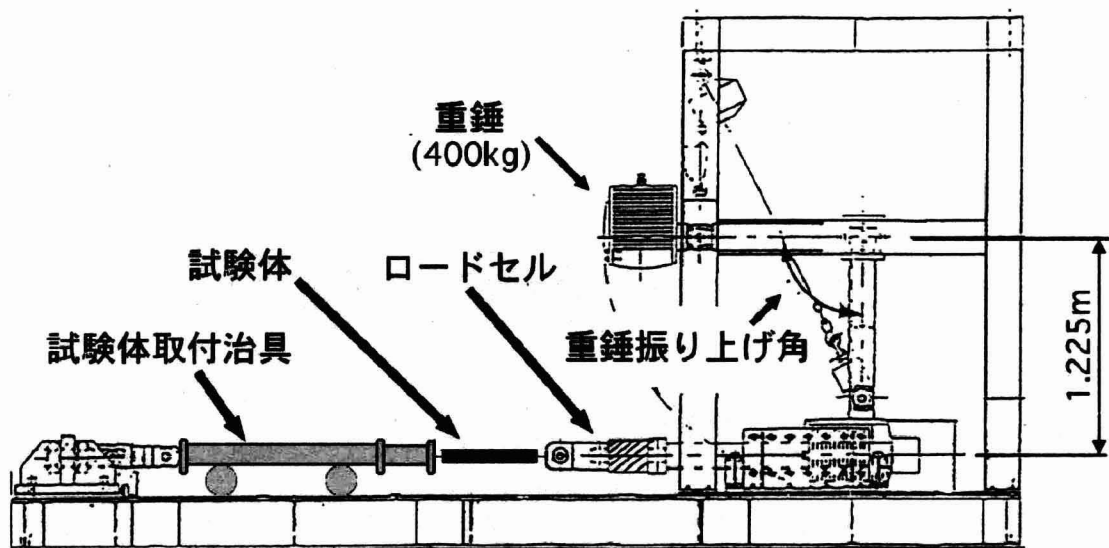


図 4.17 振り子式衝撃荷重装置

図 4.18 は、重錘振り上げ角を 20° としたときの試験体 RJ08S と SC08S における発生張力の時系列記録である。図の点線で示した値はロードセルによる計測値である。この計測値には図中に矢印で示した部分に過大な値が記録されているが、この値は使用したロードセルの固有振動数に依存するものであるため、実験結果の検討ではこれを取り除く必要がある。そこで、ここでは、ある時刻の計測値に対して単純移動平均を求めることにより、雑音の影響を除くこととした。図 4.18 は、ある時刻の計測値の両側 25 個（総数 51 個）、50 個（総数 101 個）、100 個（総数 201 個）の値に対して移動平均を求めた結果と、計測値を示したものである。

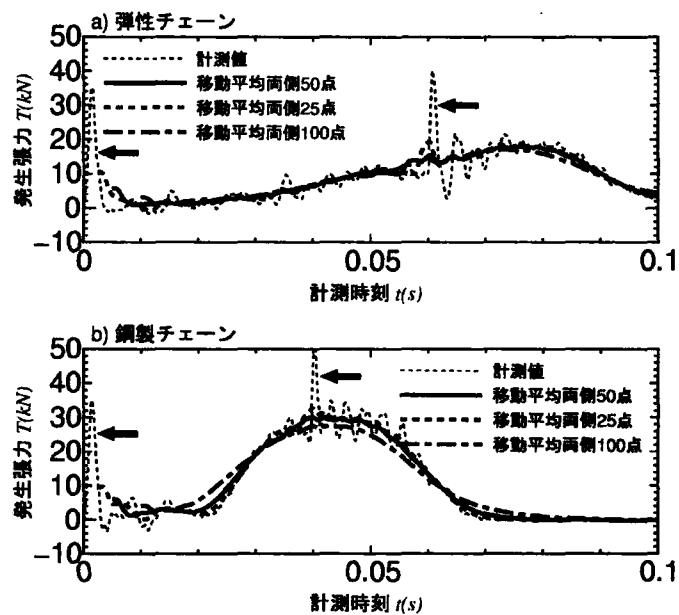


図 4.18 発生張力の実測値と移動平均値の比較

この図から、計測値の両側 25 個に関して移動平均を求めた結果では、雑音の影響が十分取り除かれていないことがわかる。一方、両側 100 点の結果では、特に鋼製チェーンにおける結果において、張力の作用時間が 0.01s 程長くなり、最大荷重も小さく見積られる傾向にある。よって、以上の検討からある時刻の計測値に対して両側 50 個（総数 101 個）の値について移動平均を求めることによって雑音の影響を除き、以降の検討では雑音の影響を取り除いた結果を用いることとする。

図 4. 19～図 4. 21 は、各試験体における発生張力の時系列記録を示したものである。これらの実験結果より、重錘の振り上げ角が 20° の場合における張力の発生時間を弾性チェーンと鋼製チェーンの間で比較すると、図 4. 19 の 7 リンクのチェーンを使用した場合は、弾性チェーンの張力発生時間は鋼製チェーンのおよそ 1.5 倍、図 4. 20 のチェーン 9 リンクの場合では鋼製チェーンのおよそ 2.5 倍、そして、図 4. 21 に示したチェーン 15 リンクを使用した場合は鋼製チェーンのおよそ 3 倍の時間となっている。これは、弾性チェーンを使用した場合、衝突後の重錘の運動によってチェーンリンク間のゴム材に変位を生じさせるため、このような張力の発生時間の差異が現れると言える。

図 4. 19～4. 21 の発生荷重のピークを比較すると、チェーンリンク数が 7 リンクおよび 9 リンクの弾性チェーンでは、重錘振り上げ角が 50° に達したとき、弾性チェーン鋼製チェーン双方の発生荷重はおよそ 60kN とほぼ等しくなる。また、チェーンリンク数が 15 リンクの弾性チェーンでは、重錘振り上げ角が 60° のとき弾性チェーン、鋼製チェーン双方の発生荷重がおよそ 45kN でほぼ等しくなる。このように弾性チェーンにおいても重錘振り上げ角を大きくした場合、すなわち、与える荷重を大きくした場合に鋼製チェーンとほぼ同等の発生荷重を示すのは、図 4. 3 に示した弾性チェーンの静的載荷特性と同様、張力が増加していくと鋼製チェーンと類似したバネ特性が表れる特性をもつ領域に至ることによると考えられる。このような状態では、チェーンリンク間に充填したゴム材の圧縮変位が最大に達し、チェーンリンク間が極めて接近した状態になっていると考えられる。よって、上記のように衝撃力を載荷した場合、ゴム材による緩衝効果が有効に発揮されず、弾性チェーンと鋼製チェーンの発生荷重がほぼ等しくなったと考えられる。

また、埋設リンク数 7 リンクおよび 15 リンクの弾性チェーンにおける発生荷重を比較すると、 $20\sim 40^\circ$ の重錘振り上げ角の範囲では、15 リンクのチェーンを用いた弾性チェーンではおよそ 15kN 以下の発生荷重で推移しているが、7 リンクのチェーンを埋設した弾性チェーンでは、鋼製チェーンに対しての荷重低減は認められるものの、その発生荷重は 15kN を超え

る値となっており、このことから、弾性チェーンの荷重低減効果には弾性チェーンの長さが関与していることが考えられる。

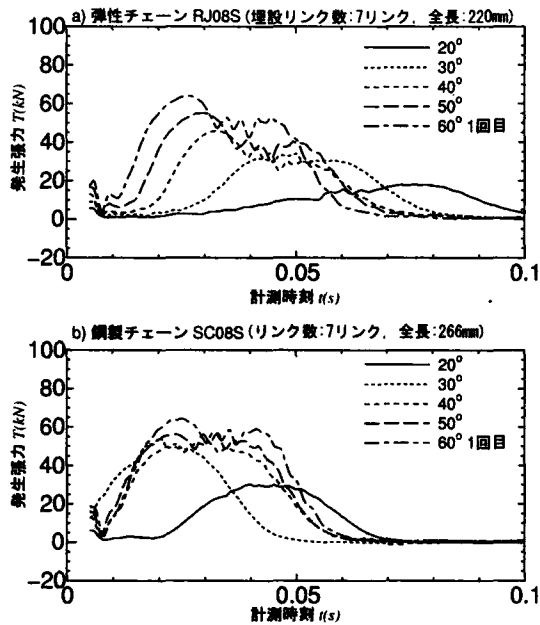


図 4.19 発生張力の時系列記録

(チェーン7リンク)

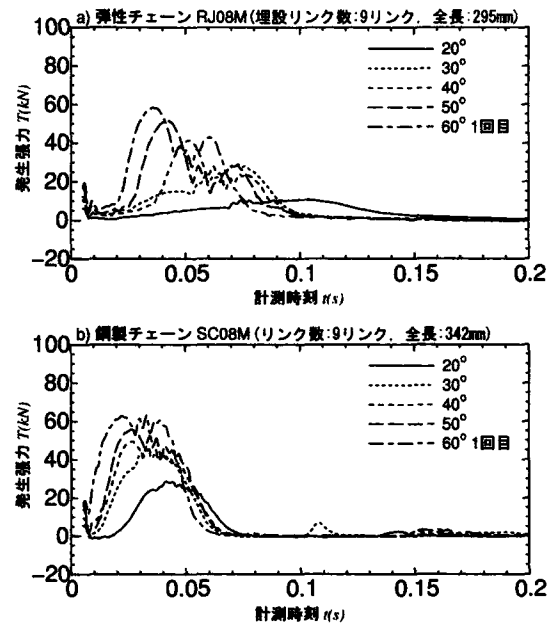


図 4.20 発生張力の時系列記録

(チェーン9リンク)

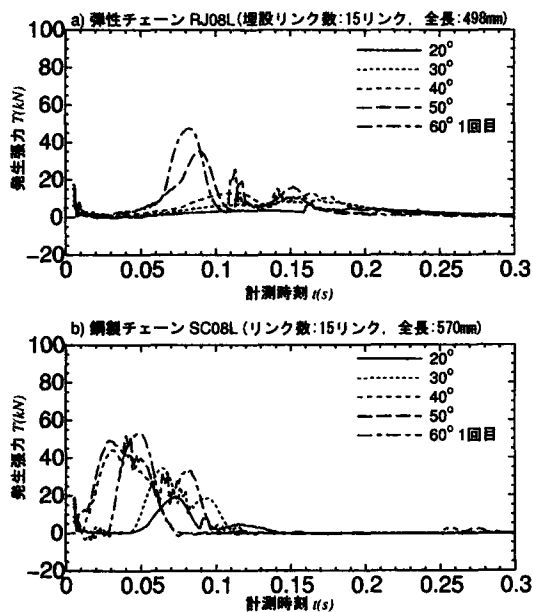


図 4.21 発生張力の時系列記録

(チェーン15リンク)

図 4. 22 は、各試験体における重錘高さと発生張力および鋼製チェーンと弾性チェーンの発生張力の比を示したものである。なお、重錘高さは、その振り上げ角から換算した値である。この図から、先に述べたようにチェーンリンク数が7および9リンクの場合（図 4. 22a, b）では重錘高さ $h_w = 0.44\text{m}$ （重錘振り上げ角 50° ）において弾性チェーンおよび鋼製チェーンそれぞれの発生張力がほぼ等しくなっていることがわかる。また、チェーンリンク数7リンクおよび9リンクの試験体では重錘高さが最も低い $h_w = 0.07\text{m}$ （重錘振り上げ角 20° ）の場合、実験に使用したチェーンの使用荷重 15.7kN 付近の値を示し、重錘高さが増加するに従ってほぼ直線的に発生張力が増加していることがわかる。

一方、チェーンリンク数が15リンクの場合、重錘高さが $h_w = 0.07 \sim 0.29\text{m}$ の範囲では発生張力の比が $R = 0.3$ 付近で安定した値を示しており、また、発生張力もチェーンの使用荷重の 15.7kN 以下の値を示している。

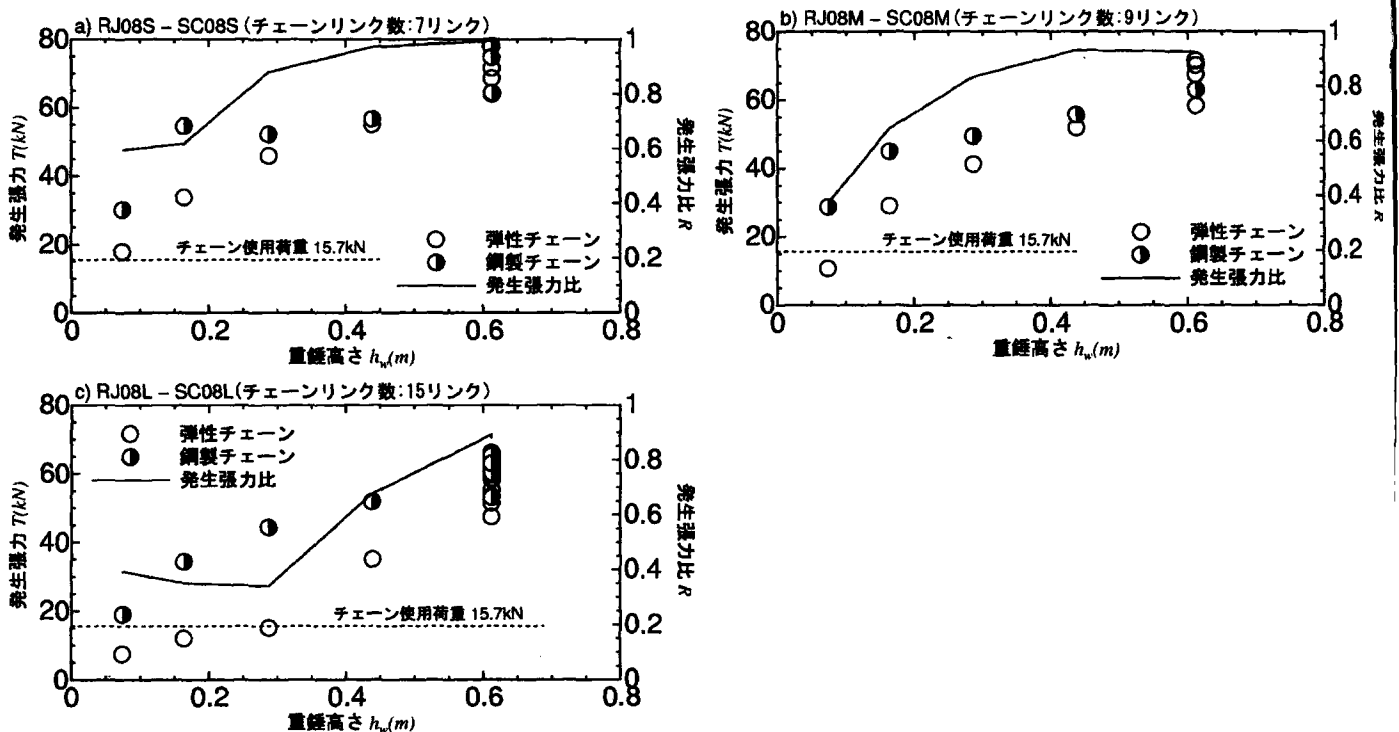


図 4. 22 各試験体における重錘高さと発生張力の比

以上の模型実験の結果から、弾性チェーンの衝撃張力の緩和効果はその長さ、すなわち埋設するチェーンリンク数に依存していることがわかる。また、重錘高さ $h_w = 0.07 \sim 0.29\text{m}$ の全範囲において、鋼製チェーンを用いた場合の発生張力がチェーンの使用荷重 (15.7kN) を上回っていることに対して、長さの短い弾性チェーンを用いた場合、 $h_w = 0.07\text{m}$ において 15.7kN 程度の張力となる。さらに、図 4.22 の発生張力を比較すると、チェーンリンク数 15 リンクの弾性チェーンの発生荷重は、リンク数 7 リンクの弾性チェーンと比較しておよそ 1/2 となっており、発生張力比についても同様の傾向を示している。このことから、先に述べたように、弾性チェーンの衝撃緩和効果は埋設するチェーンリンク数、すなわち、弾性チェーンの長さに影響を受けることがわかる。ただし、これは重錘の振り上げ角が $20 \sim 40^\circ$ の範囲で見られる傾向であり、さらに振り上げ角を増加させ重錘の落下高さを増加させると、発生張力はチェーンの破断荷重である 78.4kN に近いていく。

弾性チェーンは、図 4.2 に示したように埋設したチェーンリンク間にゴム材が充填された構造を持ち、この部分がバネとして働くことにより衝撃力の緩和効果が現れる。全長の長い弾性チェーンは、埋設するリンク数が多いため短いものと比較して伸び量が大きくなり、吸収エネルギー量が増加する。張力-伸び特性の積分値として表される吸収エネルギー量が同じとすると、全長の長い弾性チェーンでは発生張力が小さくなる。このことから、弾性チェーンの全長が長い方が、衝撃力の緩和効果が大きい。

また、静的載荷特性でも見られるようにリンク間ゴム材の圧縮が進み、リンク間が接触した状態に近くなると、弾性チェーンのバネ特性は鋼製チェーンに近い特性を示すようになる。模型弾性チェーンによる衝撃実験においても、重錘振り上げ角を $50 \sim 60^\circ$ と大きくして重錘高さを増加させると鋼製チェーンとほぼ同等の張力が発生し、弾性チェーンは破断に至ることを示している。このことから、弾性チェーンの破断強度は埋設した鋼製チェーンの強度に依存し、弾性チェーンの設計に際しては、その強度として鋼製チェーンの強度を用いることができることを示している。

4.4.3 実機規模の弾性チェーンを用いた衝撃載荷実験

模型実験により弾性チェーンによる衝撃張力の緩和効果の検討を行った。その結果、ゴム材にチェーンを埋設し、そのチェーンリンク間にゴム材を充填した構造によって衝撃張力の緩和を行うことが可能であることが明らかとなった。一方、実機規模の弾性チェーンを考慮した場合、ゴム材の体積の差異により模型と比較して硬いバネとなり、有効な衝撃緩和効果が得られない場合も考えられる。そこで、ここでは実機規模の弾性チェーンを用いて衝撃張力の載荷実験を行い、実機においても衝撃緩和が可能であるかを検討する²⁾。

図 4.23 は衝撃載荷実験に用いる振り子式衝撃荷重載荷装置である。この試験機に設置された重錘質量は 400kg であり、これをホイストクレーンで適当な角度まで吊り上げ、落下させることにより衝撃荷重を試験体に載荷するもので、先の模型実験に使用したものと同等である。

試験体は図 4.24 に示す、直径および全長が $\phi 125 \times 1210^L$ の弾性チェーンと $\phi 25$ の鋼製チェーン (JIS F 3303 2 種スタッドリンクチェーン) を用い、それぞれの試験体に対して表 4.2 の重錘振り上げ角度で衝撃荷重を載荷させた。衝撃荷重載荷時の試験体取り付け部での発生荷重は図 4.23 の A 部に設置したロードセルを用いて測定した。

表 4.2 実験ケース

重錘質量 (kg)	重錘振り上げ角 (°)	重錘高さ (m)	重錘衝突速度 (m/s)
400	40	0.787	2.4
	45	0.866	2.7
	55	1.003	3.2
	65	1.110	3.7

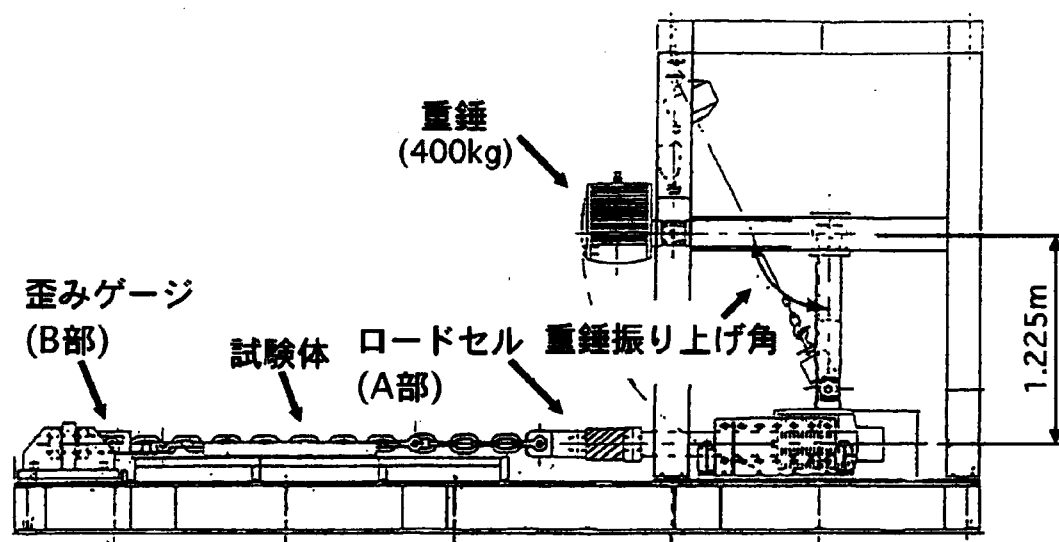


図 4.23 振り子式衝撃荷重装置

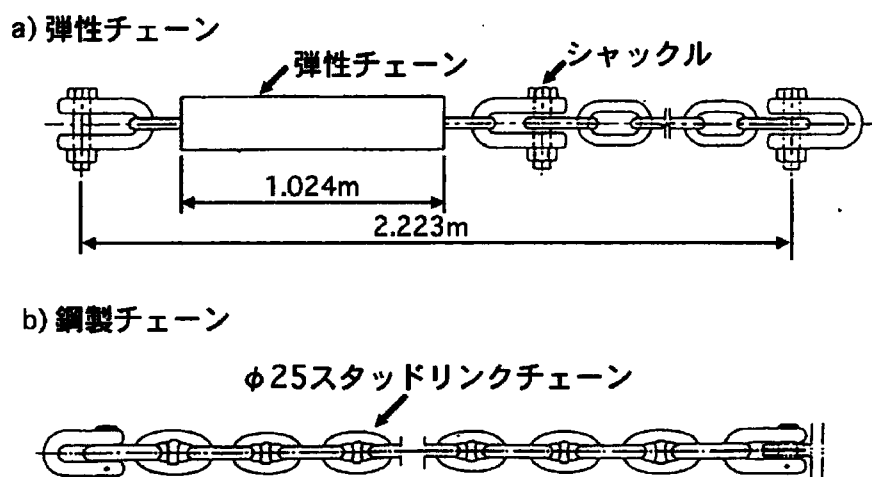


図 4.24 試験体

図 4.25 は、重錘振り上げ角 65° 、重錘衝突速度 3.7m/s における衝撃荷重時における発生荷重の時系列記録である。弾性チェーンおよび鋼製チェーンそれぞれにおける記録を比較すると、鋼製チェーンでは最大発生荷重が 120kN に達しているのに対して、弾性チェーンではその $1/2$ の値である 60kN の発生荷重を示した。

また、図 4.26 は、試験体の設置状況を緊張状態および弛緩状態とした場合の各試験体における最大発生張力の推移を示したものである。鋼製チェーンおよび弾性チェーンにおける、

弛緩・緊張それぞれの設置状況について最大発生張力を比較すると、試験体を緊張状態にした場合の発生荷重は弛緩状態の2倍程度となる。しかし、弾性チェーンを用いた実験ケースでは、重錘の衝突速度に対する発生荷重の上昇率は鋼製チェーンと比較して低い値を示しており、広範囲の衝突速度の領域において高い衝撃緩和効果を示している。

また、この実験では試験体を弛緩させた状態とした場合と緊張させた場合の2種類の設置状態で衝撃荷重を载荷した。その結果、緊張状態とした場合では、弾性チェーンおよび鋼製チェーンのいずれの場合においても発生張力は、弛緩させた場合と比較して上昇する。しかし、弾性チェーンの衝撃緩和効果は確認され、鋼製チェーンにおける発生張力の50%程度の荷重となった。このことから、弾性チェーンを係留索として使用したときその自重によって初期張力が係留索に作用するが、このような状況においても衝撃緩和効果が有効に機能することを示唆している。

なお、図4.25の時系列記録の中で、時刻0.015s付近でピークが現れている。これは、重錘が衝突した際、張力測定に用いたロードセルに瞬間的に大きな加速度が作用することにより、ロードセル内部の歪み測定部に慣性力が作用したことにより生じたノイズであると考えられる。

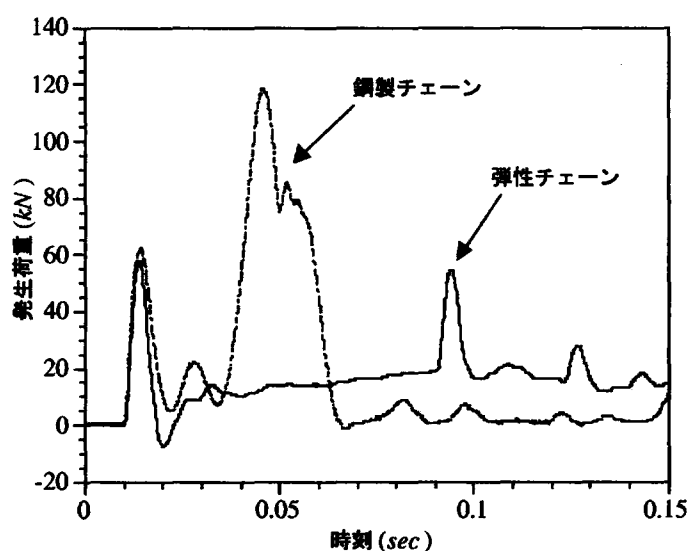


図4.25 発生荷重の時系列記録

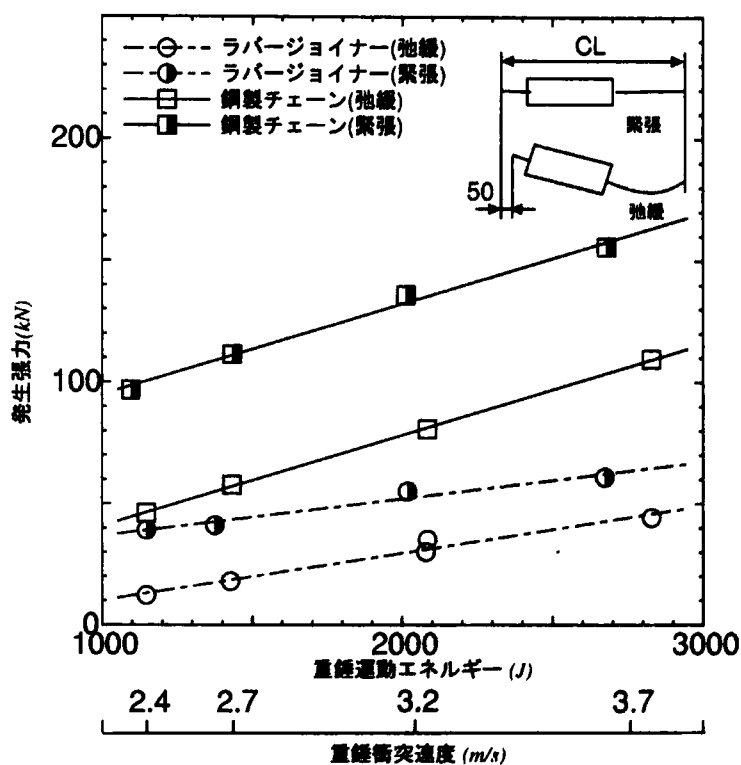


図 4.26 重錘衝突速度と最大発生荷重

4.5 結言

以上、弾性チェーンの静的载荷特性および衝撃張力の緩和効果について実験的に検討を行った。これらの結果より次のことが言える。

- (1) 弾性チェーンに埋設したチェーンリンク間の間隔「余裕量」を変化させることによって弾性チェーンの剛性を変化させることが可能である。つまり、チェーンリンクの間隔を広くした場合、張力に対する伸び変位量が大きくなり、剛性が低くなる。一方、リンク間の間隔を小さくすると伸び変位量が小さくなり、剛性が高くなる。
- (2) 鋼製チェーンをゴム材に埋設する際、ゴム材を鋼製チェーンに接着するとともに、リンク間ゴム材の周囲をゴム材でさらに被覆し、チェーンリンク間ゴム材の変形を拘束する

必要がある。これは、チェーンリンク間のゴム材が作用する張力によって過圧縮されることで破損することを防止するためである。

- (3) リンク間ゴム材の変形を拘束した場合でも、弾性チェーンのように初期応力が作用する状態で使用されるときを想定すると、拘束の有無に関わらず衝撃力の緩和効果はほとんど変わらない。よって、リンク間ゴム材の変形の拘束は、衝撃張力の緩和に影響を与えないと考えられる。
- (4) 模型実験により、ゴム材にチェーンを埋設した構造を持つ弾性チェーンは、衝撃的な張力の緩和効果を有していることを確認した。また、実機規模の弾性チェーンを用いた場合でも鋼製チェーンと比較して、衝撃張力の緩和効果を有していることを確認した。一方、弾性チェーンに与える張力を増加させていくと、最終的に鋼製チェーンにおける発生荷重と同等になる。よって、弾性チェーンの破断強度については埋設するチェーンの強度に依存することになる。
- (5) 長さの異なる模型弾性チェーンを使用した衝撃実験の結果から、弾性チェーンの衝撃緩和効果はその長さに比例して良好となる傾向を持ち、全長の短い弾性チェーンと比較して広い範囲の衝撃荷重に対応することが可能となる。
- (6) 弾性チェーンを緊張した状態、すなわち、初期張力が作用した状態においても衝撃緩和効果を得ることが可能である。ただし、これは弾性チェーンの変位量に余裕のある荷重領域にある場合において可能であると言える。

よって、これらのことから、ゴム材にチェーンを埋設する構造を有する弾性チェーンを用いることにより衝撃張力の低減が可能であることが言える。弾性チェーンの衝撃緩和効果は、ゴム材に埋設するチェーンリンク数によって効果も高くなるといえる。一方で、弾性チェーンを長くした場合、そのコストが増加する懸念がある。また、弾性チェーンの破断強度は埋設するチェーンの強度に依存するため、設計に際してはチェーンの規格強度を基に設計することができる。

参考文献

- 1) 工藤君明・生駒信康・荒川 仁：浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究（第3報），日本造船学会論文集，第159号， p. p. 171～180, 1986.
- 2) Ikoma, N. Tokubuchi, K: Experimental investigation for effect of impact load reduction in RUBBER JOINER, INTERNATIONAL RUBBER CONFERENCE 1997, p.p.810～814, 1997.

第5章 弾性チェーンの耐久性に関する実験的検討

5.1 緒言

先の章において、弾性チェーンの構造、静的載荷特性および衝撃張力の緩和効果について検討してきた。これらの検討は、要素試験体、小型の模型、あるいは実機規模の試験体を用いて検討を行った。

一方、弾性チェーンの耐久性、例えば、摩耗現象や波浪による連続的な張力の作用や係留索そのものの運動の影響による材料面の変化などの項目については室内実験では評価を行うことが困難であると考えられる。

そこで、実機の弾性チェーンを製作し、この弾性チェーンに対し繰り返し張力を載荷することによりそのバネ特性の変化を調査すること、および、弾性チェーンを実海域に敷設し、鋼製チェーンとの比較および長期間使用後のゴム材等の物性変化を調査することによって弾性チェーンの耐久性の検討を行っている。また、ここでは実機の弾性チェーンを用いることから、その製作工程について説明を行う。

5.2 弾性チェーンの製作工程について

図 5.1 は弾性チェーンの製作工程の流れを示したものである。弾性チェーンの製作工程は大きく分けて、

- (1) ゴム材の配合
- (2) 鋼製チェーンの処理
- (3) 成形・加硫

の3種類に分けられる。まず、(1)のゴム材の混合では、弾性チェーンに伸び変位および衝撃緩和効果を与えるゴム材の製造を行う。この工程では、先に説明したように生ゴム（原料ゴム）に架橋反応を生じさせるために必要な加硫剤や、ゴム材の紫外線やオゾンに対する耐久性を与えるための老化防止剤、強度を向上させるための補強剤、および加工性を向上させるための軟化剤を混合する工程である。

(1)の工程に並行して、(2)において鋼製チェーンに接着剤が塗布される。この接着剤は、弾性チェーンに張力が作用した際のゴム材の変位を拘束するために必要なものである。

(1)、(2)の2つの工程において、弾性チェーンの主要材料であるゴム材と、ゴム材内部に埋設される鋼製チェーンが準備される。そして、(3)の工程において、鋼製チェーンがゴム材に埋設、接着される。

(3)の成形・加硫の工程では、弾性チェーンに張力が作用した際に圧縮を受ける鋼製チェーンのリンク間にゴムを充填し、このゴム材と鋼製チェーンを接着する第1次加工・第1次加硫の工程と、耐摩耗性を確保するための外面層の成形と加硫を行う第2次加工・第2次加硫が行われる。

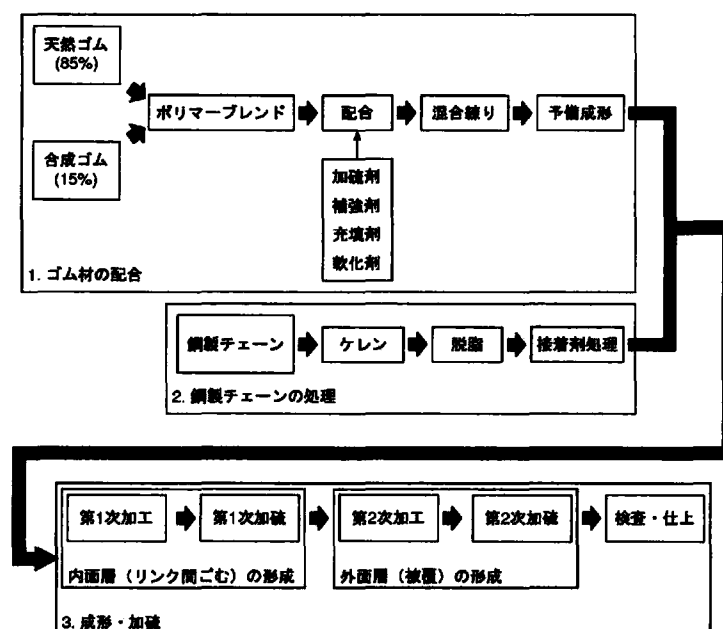


図 5.1 弾性チェーンの製造工程

加硫を行う工程では、先に説明したようにゴム材に対して圧力と熱を加える必要がある。これは未加硫ゴムと鋼製チェーンを弾性チェーン成型用金型（写真 5. 1）に封入し、その後、写真 5. 2 に示した加硫缶と呼ばれる圧力容器に当該の金型を納め、温度と圧力を加える。弾性チェーンは以上の工程を経て製作される。



写真 5. 1 弾性チェーン成型用金型



写真 5. 2 加硫缶

5.3 長期使用時における弾性チェーンの特性変化に関する検討

浮体を係留する係留索は比較的長期間にわたって使用され、波浪により常に変動する張力が作用する部材である。このため、弾性チェーンについて、長期使用時における载荷特性の変化について検討する必要がある。そこで、実機規模の弾性チェーンに対する長時間の静的連続载荷と実海域によって、弾性チェーンの長期使用時における特性変化について検討を行う。

試験体は図 5. 2 に示した $\phi 150 \times 4000^L$ の弾性チェーンを用いた。この試験体に埋設された鋼製チェーンは $\phi 24$ スタッドリックチェーン (JIS F 3303 2 種) である。なお、埋設チェーンの切断試験荷重は 332kN、耐力試験荷重は 237kN、使用荷重は 110.6kN である。

引張荷重の载荷は 600kN 型繰返し引張試験機を用いて行い、9.8kN および 29.4kN の引張

荷重を連続的に試験体に対して載荷した。その間、適宜チェーンの使用荷重まで載荷し、その際、9.8kN および 29.4kN の引張荷重における伸び量を測定した。これは、引張試験機の載荷制御における性能上の問題を回避するためにとった措置である。

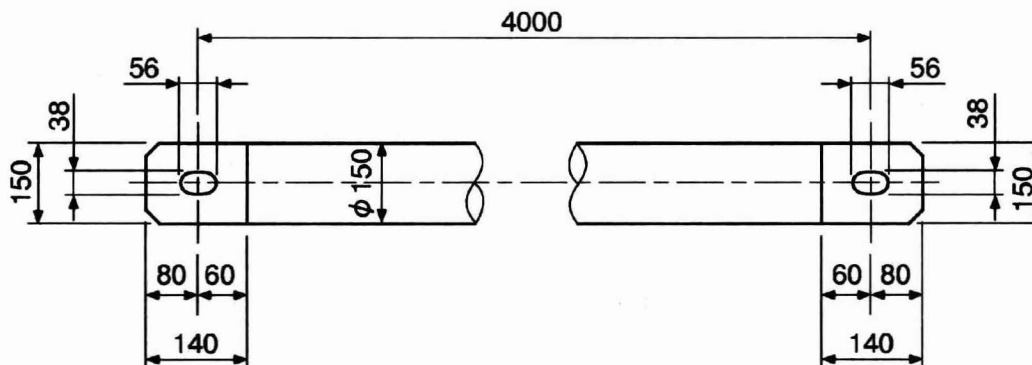


図 5.2 試験体の形状

図 5.3 は連続引張試験において各引張回数において埋設チェーンの使用荷重まで載荷した時の最大伸び量を示したものである。この図より、弾性チェーンに対して連続的に引張荷重を作用させた場合、その伸び量は引張回数の増加にしたがって変化を生じることが分かる。このようなゴム材における連続使用時の特性変化は他のゴム材を用いた港湾関連資材、例えば防舷材においても一般的に現れる変化である。一方、図 5.3 では試験機を 52 時間および 14 時間にわたり停止させたが、試験を再開した時の弾性チェーンの最大伸び量は第 1 回目の引張における最大伸び量の水準に復元していることがわかる。

弾性チェーンの構造はチェーンリンクの間隔にゴム材を充填したものであり、引張荷重の載荷時にはリンク間のゴム材に圧縮応力が集中するため、長期間に渡る使用においてはこの部分のゴム材が損傷する懸念が存在する。圧縮応力によってチェーンリンク間のゴム材が損傷した場合には、弾性チェーンの変位特性が失われ、衝撃張力の緩和効果に著しい障害をもたらす。しかし、以上の実験結果において弾性チェーンにおける最大伸び量の復元が認められ、その変位特性が失われていないことから長期使用に際してもチェーンリンク間のゴム材に損傷が生じず、衝撃緩和効果を得ることができると考えられる。

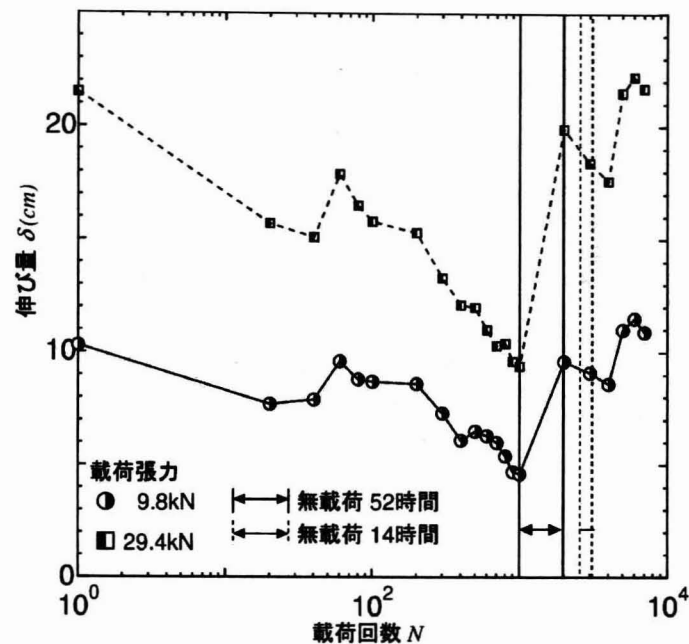


図 5.3 長時間繰返し载荷時の伸び量の変化

5.4 実海域における弾性チェーンの耐久性

5.4.1 北海道留萌沖における実海域実験について

ここでは、まず弾性チェーンと鋼製チェーンを同時に実海域に敷設し、双方の状況の比較を行った実験について示す。

実験は北海道留萌沖（黄金岬沖）の水深 20m の海域において行った。現地の海底面の状態は、主に岩および砂によって表面が構成されている。実験に使用した弾性チェーンは写真 5.3 に示した直径 $\phi 130\text{mm}$ 、長さ 5m のものであり、これと $\phi 22$ のスタッド付チェーンを写真 5.4 に示したように双方を並列に敷設する状況として航路標識ブイの 1 点係留に用いた。なお、設置期間は 1 年間である。



写真 5.3 実験に使用した弾性チェーンの
形状



写真 5.4 弾性チェーンと鋼製チェーン
の設置状態

写真 5.5 は、設置後 1 年を経過した弾性チェーンと鋼製チェーンの状態を比較したものである。この写真より、鋼製チェーンでは顕著に摩耗現象が生じ、線径が減少したチェーンリンクが存在した。このようなチェーンリンクでは、リンクに取り付けられたスタッドの脱落が生じているものが存在した。なお、チェーンリンクの線径の減少は 1 年間に 2 mm であった。この摩耗減少は、チェーンリンクと海底の岩や砂と接触したことによって生じたと考えられる。一方、弾性チェーンでは、目視による観察を行った結果、表面に岩や砂との接触によって生じたと考えられる擦過痕が生じていたものの、弾性チェーンの外面ゴムが著しく摩耗され、直径が減少するなどの箇所は認められなかった。

また、摩耗現象は大きく分類して、材料が粗度の大きな面に圧縮力を受けつつ接触することによって生じる摩耗（圧縮摩耗）と、材料に対して摩耗の原因となる物体が材料表面に衝突することによって生じる摩耗（衝突摩耗）の 2 種類に分けられる。ゴム材の摩耗について検討した場合、ゴム材が圧縮摩耗を受ける場合では自動車用タイヤなどで生じる表面厚さの減少に見られるように、著しい摩耗が生じる場合が存在する。一方、衝突摩耗の場合では、ゴム材の反発弾性によって摩耗の原因となる物体がゴム材の表面に衝突したとしても、そのときに生じる衝撃力を緩和する効果を有するため摩耗が生じにくくなると考えられる。

実験に供した弾性チェーンにおける摩耗は、表面に著しい摩耗減少が生じていないことが

らから係留索表面に対して砂あるいは岩の衝突が摩耗の主原因と考えられ、弾性チェーンではゴム材の反発弾性によって摩耗が防止されたものと考えられる。

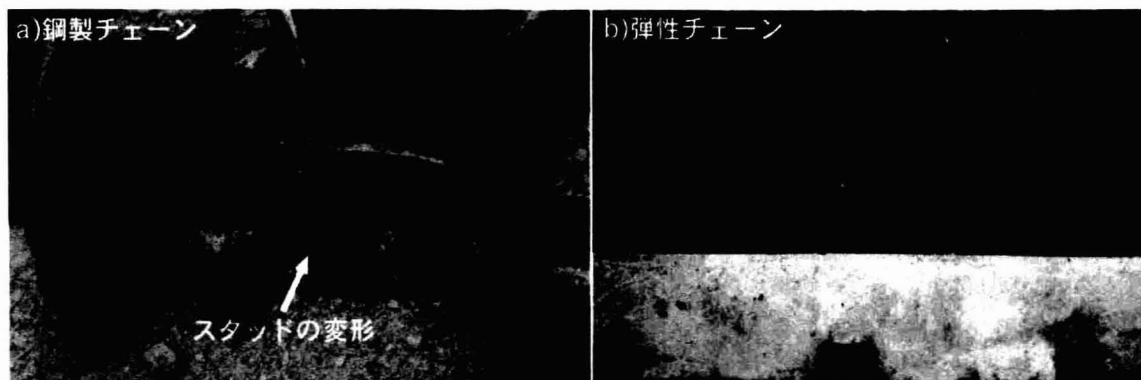


写真 5.5 弾性チェーンと鋼製チェーンの状態比較

このように、浮体チェーンではチェーンリンクが摩耗されることにより線径の減少やスタッドの脱落が生じた場合、チェーンの機械的強度の低下が生じていると考えられる。

以上の実海域における実験結果より、同一の使用条件において、弾性チェーンと鋼製チェーンの状態を比較した場合、弾性チェーンは耐摩耗性において明らかに優位性を持つといえる。

5.4.2 大分県の海洋牧場において使用された弾性チェーンについて

さらに長期間にわたって実海域において使用された弾性チェーンの耐久性について検討を行った²⁾。検討対象は大分県の海洋牧場においてブイの係留に用いた弾性チェーンである。対象となる弾性チェーンの形状は図 5.4 に示したものであり、直径、全長および埋設チェーンの諸元は表 5.1 に示したものである。

ブイの係留状況の概要は図 5.5 に示したものである。現地海域の水深は 57m (L. W. L) であり、海底の底質は泥状である。弾性チェーンは海底面近傍のカテナリーの立ち上り部分付近に 2 基設置され、シンカー側の弾性チェーンはほぼ泥に埋設した状態であった。以下、ブイ側に設置された弾性チェーンを「弾性チェーン A」、シンカー側のものを「弾性チェーン B」と

呼称する。

表 5.1 実海域に設置した弾性チェーンの諸元

項目	仕様
形状	$\phi 200 \times 25,000\text{L}$
埋設チェーン	$\phi 38$ スタッドリンクチェーン (JIS F 3303 2種)
チェーン耐力荷重	581kN (59.2tf)
使用期間	7年6ヶ月

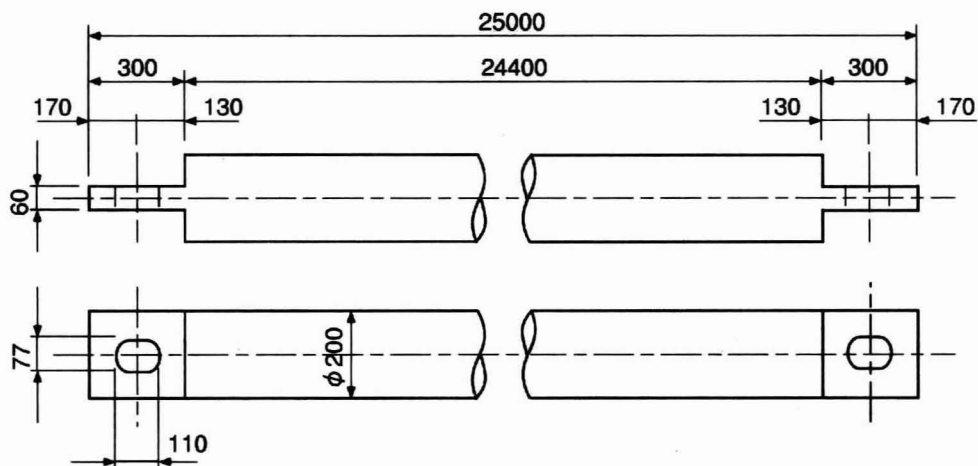


図 5.4 弾性チェーンの形状

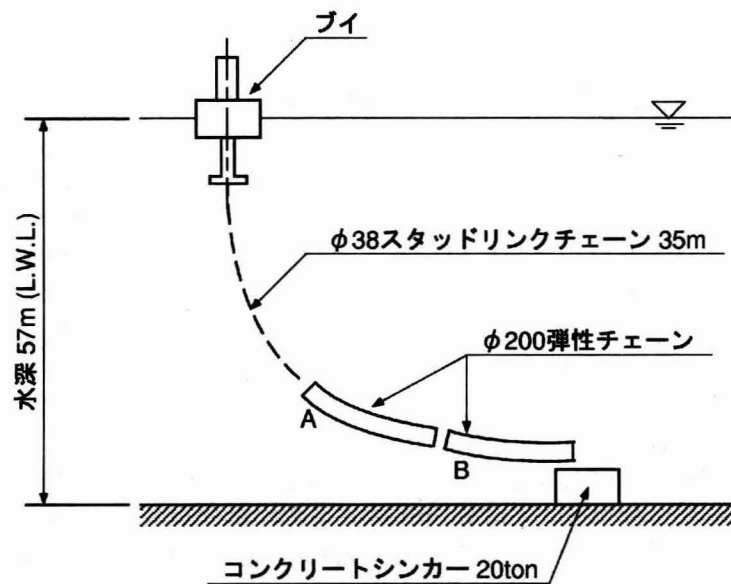


図 5.5 ブイの係留状況

写真 5.6 は、弾性チェーンAの外面被覆ゴムにおける表面状態を示したものである。この図では弾性チェーン表面のゴムが部分的に摩耗し、埋設チェーンが露出している部分が認め

られる。また、図 5.6 は調査を行った弾性チェーンについて長さ方向に沿って直径を測定したものである。写真 5.6 および図 5.6 からわかるように弾性チェーン A では外面被覆ゴムの一部に摩耗が進行した部分が認められる。

弾性チェーン A の局所的な摩耗は、詳細な海底面の状況が不明ではあるが、海底の岩石など比較的硬いものと弾性チェーンが長期にわたって接触し、この部分がブイの触れ回り運動などによって集中的に荷重を受けたために生じたものと考えられる。

しかし、鋼製チェーンのみを係留索として用いた場合には、係留索に対して直接摩擦が作用し、鋼における摩耗の進行がゴム材と比較して著しく早いことを考慮すると、弾性チェーンでは鋼製チェーンをゴム材で被覆しているため、内部に埋設した鋼製チェーンが直接摩擦を受けるまでに比較的長時間必要であると言える。よって、係留索の摩耗対策として弾性チェーンを使用することは有効であると考えられる。



写真 5.6 弾性チェーンの摩耗状況

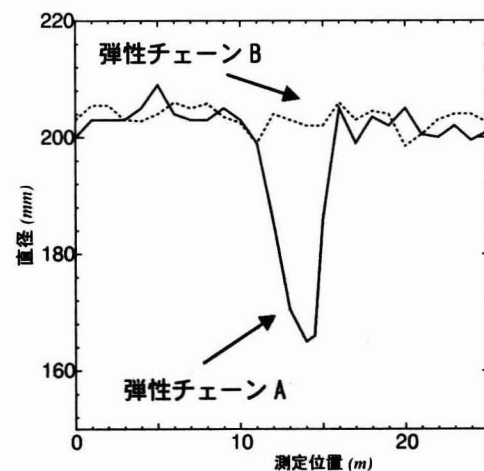


図 5.6 弾性チェーンの長さ方向における直径変化

次に、弾性チェーンの耐久性について材料の面から検討を行う。写真 5.7 は 7 年 6 ヶ月に渡り実海域に設置した弾性チェーンの表面を倍率 50 倍で拡大したものである。この図に示されるように弾性チェーンの外面被覆ゴムの表面には微細なクラックが存在することがわかる。しかし、これらのクラックは表層の 1 mm 程度の深さにのみ見られ、このクラックが弾

性チェーンの埋設チェーン付近までは到達しておらず、弾性チェーンの変位特性には何ら影響を及ぼさないと考えられる。

また、この弾性チェーンゴム材の物性の変化を検討するために、当該の弾性チェーンからブロック状にゴム材をサンプリングし、中心方向に向かって0.5mm毎にマイクロゴム硬度計を用いてゴムの硬度を測定した。加えて、このゴムブロックを表面から厚さ5mmずつにスライスしたものを図5.7に示すダンベル状の試験体を作成して引張強度を測定し、表5.2のゴム材の物性基準¹⁾と比較を行った。

表 5.2 ゴム材の物性基準

試験項目		規格値
老化前	引張強さ	15.7N/mm ² (160kgf/cm ²) 以上
	伸び	350%以上
	硬さ	72° 以下
	圧縮永久歪み	30%以下
老化後	引張強さ	老化前値の80%以上
	伸び	老化前値の80%以上
	硬さ	老化前値の+8° 内でかつ76° 以下

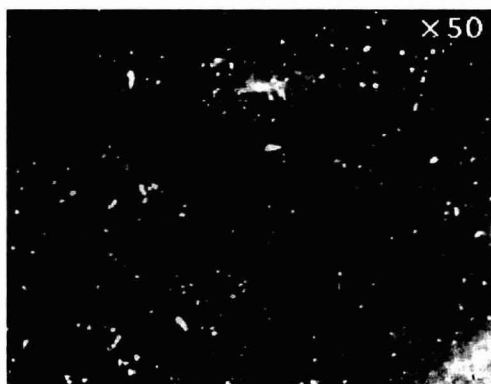


写真 5.7 弾性チェーン表面の拡大写真

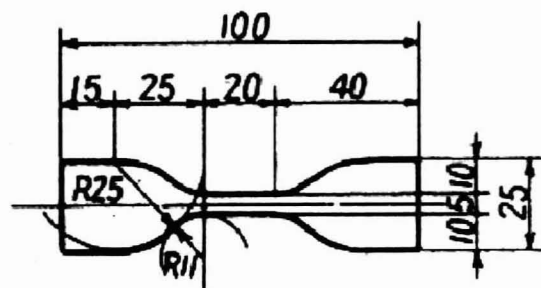


図 5.7 ダンベル型試験片

図5.8は弾性チェーン中心方向に向かって測定したゴム材の硬度を示したものである。この測定結果によると表面部のゴム材の硬度は物性基準における老化後の硬度の上限値76に達しているが、表面からの深さ0.5mm以降ではゴム材の硬度は67～56°あり、老化前および老化後のゴム材の硬度の基準値を越えない範囲であった。一般に、ゴム材は老化が進行する

と硬度が高くなる傾向にある。調査対象とした弾性チェーンでは、表面部のごく浅い範囲では老化が認められるものの、内部のほとんどの部分では製作時のゴム材の硬度を維持しており老化は進行していないと言える。

図 5.9 は、弾性チェーンの中心方向に向かって深さ毎に作成したダンベル状試験体の引張試験によるゴム材の破断時の応力を示したものである。この図より、表面部から採取した試験体の引張強度は老化後の強度基準を下回る 9.2MPa であったが、これ以外の深さ 5mm 以上の部分から採取したものでは老化前の基準値である 15.7MPa である 19.4~22.9MPa の引張強度を維持していた。

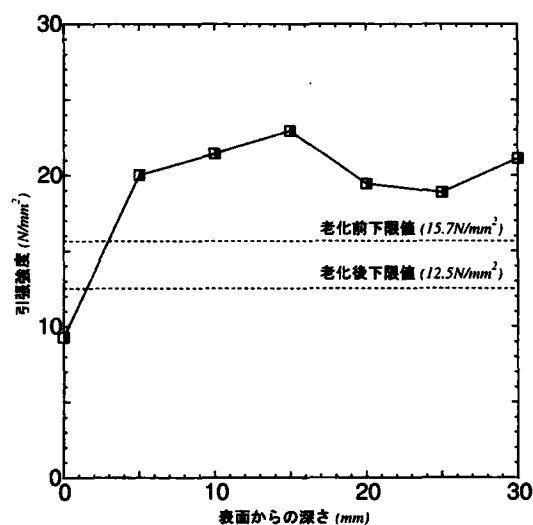
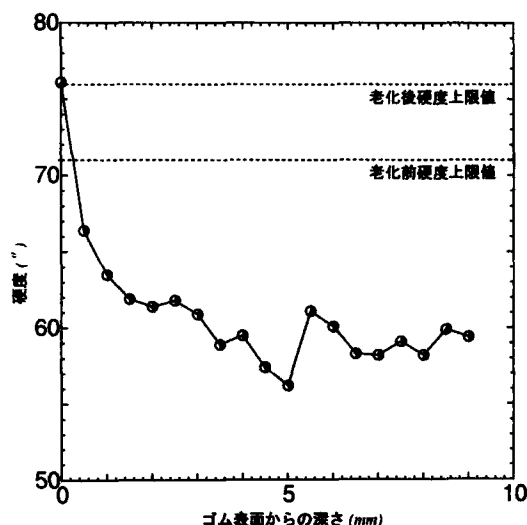


図 5.8 弾性チェーン断面における深さ方向のゴム硬度変化 図 5.9 弾性チェーン断面における深さ方向のゴム引張強度変化

以上の 7 年 6 ヶ月に渡り実海域に設置した弾性チェーンのゴム材の硬度および引張強度の調査結果から、表面から中心に向かって 5mm の深さまでは海水や連続的な载荷の影響により老化が進行しているものの、深さ 5mm を越える範囲では製作時のゴム物性を維持しており十分な耐久性を維持していると言える。

5.5 結言

以上の実験および調査結果から、下記のことがわかった。

- (1) 弾性チェーンに対して連続的に張力が作用する場合、張力の作用回数に従ってバネ特性に変化が生じる。しかし、載荷を中断し、弾性チェーンをしばらく静置するとバネ特性は初期の状態にほぼ近くなる。このことから、チェーンリンク間のゴム材は連続的に変形した場合においても破損することがないと言える。
- (2) 鋼製チェーンと弾性チェーンを並列に1年間設置した実験結果では、鋼製チェーンではスタッドの脱落を伴う著しい摩耗現象が生じたことに対して、弾性チェーンでは直径の減少などの顕著な摩耗は観察されなかった。また、この実験における摩耗は、係留索表面に砂や岩が衝突することによって生じる衝突摩耗が主な原因と考えられ、弾性チェーンでは表面のゴム材の反発弾性により摩耗が防止されたと考えられる。
- (3) 7年6ヶ月に渡り実海域に設置した弾性チェーンでは、係留索が海底面から立ち上がる部分において摩耗による直径の減少が生じていた。これは、当該部分が湾曲した状態となり、表面に常に張力が作用した状態で海底面の砂と接触したために摩耗が進行したものと考えられる。しかし、鋼とゴム材の摩耗の進行速度を考慮した場合、ゴム材の摩耗の進行は比較的遅いため係留索の耐久性の向上にゴム材が寄与していると言える。
- (4) 7年6ヶ月の間、実海域に設置した弾性チェーンのゴム材の劣化について調査した結果、表面から5mmの部分では引張強度の低下と硬度の増加が現れたものの、これより深い部分ではゴム材の強度・硬度の規格を上回る結果となった。このことから、弾性チェーンの表面に近い部分を除いてゴム材の劣化はほとんど認められず、全体的には初期の強度および硬度を維持していると言える。
- (5) また、この弾性チェーンでは表面から1mm程度の深さの部分において微細なクラックが生じているが、このクラックは埋設チェーンが存在する深い部分までは到達しておらず、張力の載荷による伸びなどの変位に影響を与えないと考えられる。

以上の実験結果より、弾性チェーンは鋼製チェーンと比較して摩耗に対する耐久性が高く、係留索の機械的摩耗による強度低下を防止することができると言える。一方、弾性チェーンの設置状態や海底面の状況により、弾性チェーンの表面を被覆するゴム材の摩耗形態が変化することも示唆している。

また、材料面では長期間を経た場合でも、ごく表面に近いゴム材では劣化が生じるものの、弾性チェーンの断面を構成するゴム材のほとんどはゴム材の強度基準を上回る強度を維持している。よって、ゴム材は弾性チェーンを長期間使用した場合でもほとんど劣化が生じないと言える。

参考文献

- 1) 社団法人日本港湾協会：港湾工事共通仕様書，p. p. 115～118，1983.
- 2) 徳渕克正・西野好生：浮体係留に用いる弾性チェーンの耐久性と衝撃緩和特性に関する検討，
第15回海洋工学シンポジウム，p. p. 103～110，2000.

第6章 バネー質点系による係留索張力算定方法に関する検討

6.1 緒言

前章までに行なった弾性チェーンに関する実験的な検討や，実海域に設置した弾性チェーンの調査結果より，弾性チェーンが係留索の摩耗防止および衝撃張力の緩和に対して有効であることが示されている．しかし，弾性チェーンの製作には，部材として鋼製チェーンの他にゴム材が必要であるとともに，ゴム材とチェーンとの接着やゴム材の加硫などの工程を必要とし，その結果，鋼製チェーンと比較して初期費用が大きくなることは否定できない．

また，従来，航路標識ブイなどの係留に弾性チェーンを使用する場合，写真 6.1 に示すようにブイ直下からアンカーブロックまでの係留索のほぼ全長を弾性チェーンとする場合が多く，鋼製チェーンだけを用了した場合と比較して係留系全体における係留索の費用を高価なものとする考えられる．

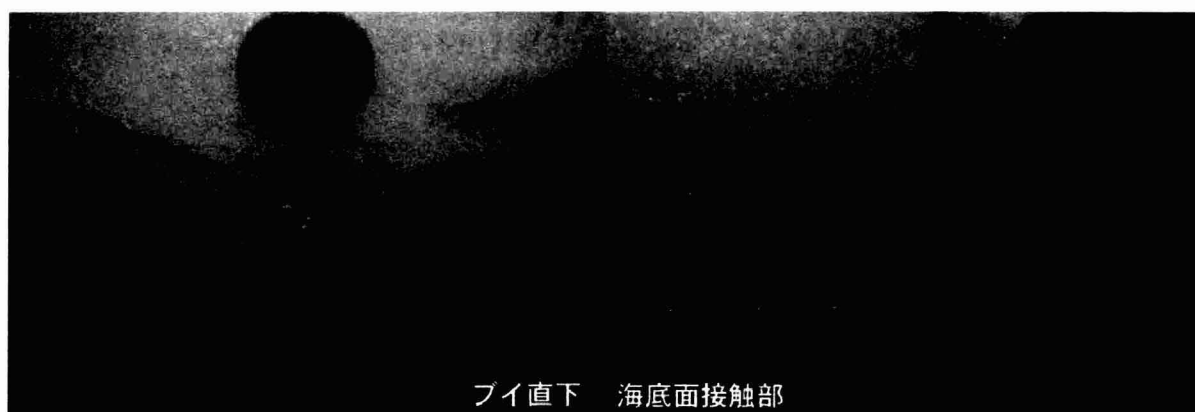


写真 6.1 実海域における弾性チェーンの設置例

そこで、弾性チェーンの使用による係留索に必要な費用の上昇を最小限に押える方法としては、弾性チェーンの係留索への設置長さを必要最小限にとどめることが最も効果的であると考えられる。例えば、係留索が海底面に接触する部分に弾性チェーンを適用し、係留索の摩耗防止を主要な目的とすることや、係留索に作用する衝撃張力を緩和するために必要最小限の弾性チェーンの長さを設定することである。

このうち、係留索の摩耗防止を目的として弾性チェーンを用いる場合、その設置位置および長さはカテナリー理論¹⁾を用いて、海中の係留索の形状を推定することによって概ね決定することが可能である。一方、係留索に作用する衝撃張力の低減に必要な最小の弾性チェーン長さを決定するためには、ブイ等の浮体構造物に波浪が作用したときに生じる衝撃張力を求め、これの低減に必要な弾性チェーンのバネ定数や設置長さを検討する必要がある。

このような係留索に弾性チェーンを適用した場合の、弾性チェーン設置長さ・バネ特性と衝撃張力の低減効果について検討した例としては、平石らによる研究²⁾がある。この研究事例では、水理模型実験により弾性チェーンの長さを係留索全長の25%とした場合でも、鋼製チェーンだけを使用した場合に発生する張力の1/4とする効果が得られている。また、この研究では、水粒子速度によるブイの運動エネルギーと弾性チェーンと鋼製チェーンの合成弾性率から、係留索に生じる張力を求める方法が提案されている。この張力検討方法は、係留索の張力と弾性チェーンによるその低減効果を推定することが可能である。

しかしながら、上述の計算方法は弾性チェーンの設置位置を検討対象としていないため、摩耗防止効果を含めた最適な弾性チェーンの設置位置を検討するためには他の方法を選択する必要がある。また、ブイの規模・係留索の長さ・水深などによっても係留索に作用する衝撃張力や、弾性チェーンの張力低減効果が変化することが考えられるが、これら個々の係留状況に対して、逐次、水理模型実験を行なうことは困難である。加えて、係留索への弾性チェーンの適用は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾に示唆されているが、具体的な設計方法については言及されていない。

そこで、本章では、鋼製チェーンと弾性チェーンを組み合わせる用いるように、1ラインの係留索に異なったバネ特性を有する要素が混在する状態を考慮し、衝撃的な張力の推定を行うことのできる係留索張力の数値シミュレーションの方法について検討を行う。

6.2 係留索張力の計算モデルとその計算方法

6.2.1 計算方法選定の方針

係留索張力の計算方法としては、ブイ等の浮体構造物に作用する水平力から静的な釣り合いを考えて係留索張力を求める方法⁴⁾が最も簡便で、広く利用されている方法と考えられる。しかし、係留索の一部に弾性チェーンを適用する係留索では、係留索のバネ定数と自重が係留索の全長に沿って一様でないことと、そして、計算結果に衝撃張力を加味することが困難であることから、この方法を弾性チェーンが用いられた係留索の設計に利用することは困難である。

係留索の一部に弾性チェーンを設置した場合の張力の計算方法としては、先に述べたように、平石ら²⁾によって提案された方法がある。この方法では、計算が容易であるとともに精度の良い係留索張力の推定が可能であるが、弾性チェーンの設置位置による衝撃張力の変化やチェーンの摩耗防止を考慮する際に重要となる係留索の運動については検討の対象となっていない。

そこで、この章では、以下の3項目を条件とし、係留索張力の計算モデルとしてlumped-massモデルを選択する。

- (1) 係留索に作用する衝撃張力が算定できること
- (2) 弾性チェーンの設置位置および長さが比較的自由に設定できること
- (3) 水中における係留索の運動が検討できること

この方法では、図 6.1 のように係留索をパネー質点系として表し、各質点の位置における水粒子の速度・加速度による抗力と慣性力および各質点間の張力を用いて各質点に関する運動方程式を解くものである。通常、lumped-mass 法では質点間の伸び量を無視し、運動方程式中から質点間張力を消去して質点の位置を計算する^{5) 6)}。

しかし、弾性チェーンは鋼製チェーンと比較して質点間の伸び量が著しく大きく、この伸びによって係留索張力の緩和特性が生じること、そして、弾性チェーンの張力-伸び変位特性が非線形性を有するため、質点間張力を消去することは困難である。よって、基本的な計算方法は、波による水粒子の運動から、係留索各質点の加速度、速度そして位置を求め、各質点の位置から係留索の伸び量と張力を計算するといった手順で行うものとする。

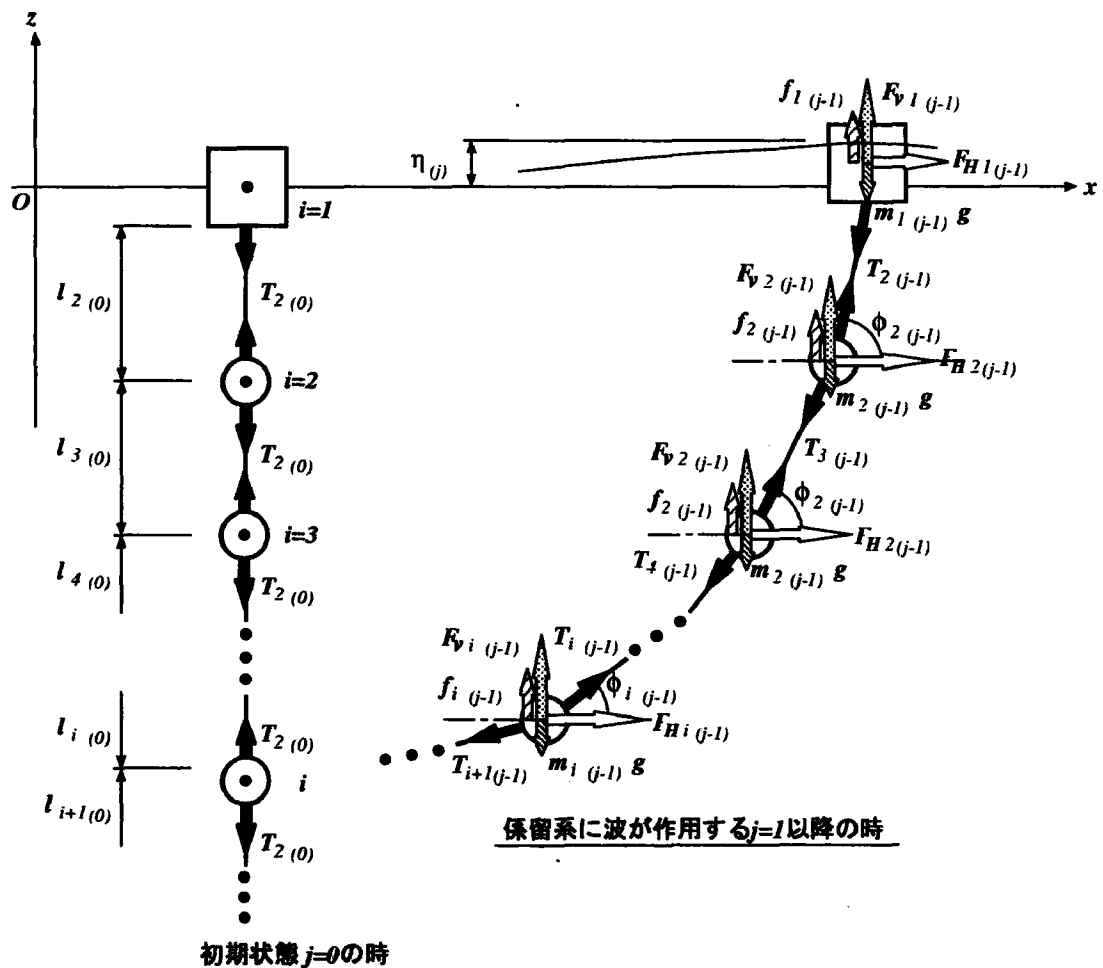


図 6.1 計算モデル

6.2.2 各質点の運動方程式

係留索の計算モデルは1点係留ブイを対象とし、各質点には、波浪あるいは流れによる流体力、質点間に作用する張力、係留索およびブイの浮力、自重が作用している。これらの外力および荷重をもとに各質点に関して運動方程式を作成し、これを各計算時刻毎に解くことによって各質点の運動が求められる。

図 6.1 に示した1点係留ブイ系の計算モデルにおいて、質点数を n 個として各質点の位置を表すと $(x_1, z_1), (x_2, z_2), \dots, (x_i, z_i), \dots, (x_n, z_n)$ となる。なお、質点1はブイ、質点 n はアンカ一点である。

まず、各質点に作用する流体力は、水平方向の流体力を F_{Hi} 、鉛直方向の流体力を F_{Vi} とすると、それぞれの流体力は式(6.1)、(6.2)として表される。

$$F_{Hi} = \rho C_M V_i (\dot{u}_i - \ddot{x}_i) + \frac{1}{2} \rho C_D V_i A_{xi} |u_i - \dot{x}_i| (u_i - \dot{x}_i) \quad (6.1)$$

$$F_{Vi} = \rho C_M V_i (\dot{w}_i - \ddot{z}_i) + \frac{1}{2} \rho C_D V_i A_{zi} |w_i - \dot{z}_i| (w_i - \dot{z}_i) \quad (6.2)$$

ここに、 ρ ：海水の密度、 C_M ：質量係数、 C_D ：抗力係数、 A_{xi} 、 A_{zi} ：各質点の水平・鉛直方向の投影面積、 V_i ：各質点の体積、 \ddot{x}_i 、 \ddot{z}_i ：各質点の水平・鉛直方向の加速度、 \dot{x}_i 、 \dot{z}_i ：各質点の水平・鉛直方向の速度、 \dot{u}_i 、 \dot{w}_i ：各質点の位置における水粒子の水平・鉛直方向の加速度、 u_i 、 w_i ：各質点の位置における水粒子の水平・鉛直方向の速度である。

各質点の投影面積 A_{xi} 、 A_{zi} は、質点の位置や係留索中での位置によって計算方法が異なるため後述する。また、ブイを除く各質点の体積 V_i は、質点が弾性チェーンの場合には円筒として考え、弾性チェーンの直径を D_i とすると、

$$V_i = \frac{\pi}{4} D_i^2 l_i \quad (6.3)$$

として求めるものとする。また、鋼製チェーン、特に JIS F 3303 スタッドリンクチェーンとした場合にはチェーン呼び径を d (mm) とすると、チェーンの形状を円柱の集合として扱うと、

$$V_i = 12.227 \times \left(\frac{d}{1000} \right)^3 \quad (6.4)$$

として求める.

なお、ブイを除く各質点の浮力 f_i は、重力加速度を g とすると、式 (6.5) によって表される。係留索に発生する張力にはブイに作用する流体力も影響するが、ブイの体積および浮力については水面形と関連して変化することから後述する.

$$f_i = \rho g V_i \quad (6.5)$$

各質点の運動方程式は、式 (6.1), (6.2) に示した各質点に働く流体力および式 (6.5) に示した浮力から、式 (6.6) および (6.7) のように表される.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= F_{H1} - T_2 \cos \phi_2 \\ m_1 \ddot{z}_1 &= F_{V1} - T_2 \sin \phi_2 + f_1 - m_1 g \end{aligned} \right\} (i=1) \quad (6.6)$$

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{x}_i &= F_{Hi} + T_i \cos \phi_i - T_{i+1} \cos \phi_{i+1} \\ m_i \ddot{z}_i &= F_{Vi} + T_i \sin \phi_i - T_{i+1} \sin \phi_{i+1} + f_i - m_i g \end{aligned} \right\} (2 \leq i < n) \quad (6.7)$$

これらの式に各計算時刻における水面形、水粒子の加速度および速度、各質点の投影面積を代入し、各質点の加速度を求める。ただし、各質点の加速度を算定するに当たって、必要な流体力、各質点の速度や張力および係留索の角度などの値は1ステップ前の時刻における値を用いた。よって、各質点の運動方程式に計算時刻 j を導入すると、式 (6.6) と式 (6.7) は次式のようになる.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{1(j)} &= F_{H1(j)} - T_{2(j-1)} \cos \phi_{2(j-1)} \\ m_1 \ddot{z}_{1(j)} &= F_{V1(j)} - T_{2(j-1)} \sin \phi_{2(j-1)} + f_1 - m_1 g \end{aligned} \right\} (i=1) \quad (6.8)$$

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{x}_{i(j)} &= F_{Hi(j)} + T_{i(j-1)} \cos \phi_{i(j-1)} - T_{i+1(j-1)} \cos \phi_{i+1(j-1)} \\ m_i \ddot{z}_{i(j)} &= F_{Vi(j)} + T_{i(j-1)} \sin \phi_{i(j-1)} - T_{i+1(j-1)} \sin \phi_{i+1(j-1)} + f_i - m_i g \end{aligned} \right\} (2 \leq i < n) \quad (6.9)$$

式 (6.8) と (6.9) における水平力 $F_{Hi(j)}$ と鉛直力 $F_{Vi(j)}$ は次式のようになる.

$$F_{Hi(j)} = \rho C_M V_i (\dot{u}_{i(j)} - \ddot{x}_{i(j-1)}) + \frac{1}{2} \rho C_D V_i A_{xi(j-1)} |u_{i(j)} - \dot{x}_{i(j-1)}| (u_{i(j)} - \dot{x}_{i(j-1)}) \quad (6.10)$$

$$F_{Hi(j)} = \rho C_M V_i (\dot{w}_{i(j)} - \ddot{z}_{i(j-1)}) + \frac{1}{2} \rho C_D V_i A_{zi(j-1)} |w_{i(j)} - \dot{z}_{i(j-1)}| (w_{i(j)} - \dot{z}_{i(j-1)}) \quad (6.11)$$

式 (6.8) と (6.9) から各質点の加速度 $\ddot{x}_{i(j)}$, $\ddot{z}_{i(j)}$ が求まると, 計算時刻 j における各質点の速度 $\dot{x}_{i(j)}$, $\dot{z}_{i(j)}$ と位置 $(x_{i(j)}, z_{i(j)})$ それぞれは, 計算時刻 $j-1$ から j の間の微小時間を Δt とすると, 式 (6.12) および式 (6.13) のように表される.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i(j)} &= \frac{\Delta t}{2} (\ddot{x}_{i(j)} + \ddot{x}_{i(j-1)}) + \dot{x}_{i(j-1)} \\ \dot{z}_{i(j)} &= \frac{\Delta t}{2} (\ddot{z}_{i(j)} + \ddot{z}_{i(j-1)}) + \dot{z}_{i(j-1)} \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{i(j)} &= \frac{\Delta t}{2} (\dot{x}_{i(j)} + \dot{x}_{i(j-1)}) + x_{i(j-1)} \\ z_{i(j)} &= \frac{\Delta t}{2} (\dot{z}_{i(j)} + \dot{z}_{i(j-1)}) + z_{i(j-1)} \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

6.2.3 係留索のバネ特性のモデル化

図 6.1 に示したモデルのようにして係留索張力を求める場合, 各質点間はバネで接続されているとして取り扱い, 質点間の位置からバネの伸び量 $\Delta l_{i(j)}$ を求め, フックの法則によって質点間に作用する張力 $T_{i(j)}$ を求める方法が一般的と考えられる. ここでも, フックの法則を用いて質点間張力を求めるものとする.

フックの法則を用いて質点間張力を計算する場合, 各質点間のバネ定数を決定しておくことが必要である. バネ定数は各質点間を弾性チェーンあるいは鋼製チェーンを用いてつないだ場合のそれぞれにおいて, 決定方法が異なる.

まず, 弾性チェーンの場合, その変位率 δ_c と張力の関係は図 6.2a) に示される. このように弾性チェーンの変位率—張力の関係は非線形性を示す. そこで, ここでは簡単のために変

位率-チェーンの関係を図 6. 2a) の一点鎖線で示したように変位率をいくつかの区間に分割して、その区間の張力を $T_{i(j)} = k_i \delta_c + a$ として線形に近似することを考えた。ここに、変位率 δ_c は $\delta_c = \Delta l / l_0$ で、初期の長さ l_0 のものが Δl 伸びたときの伸び率を示す。

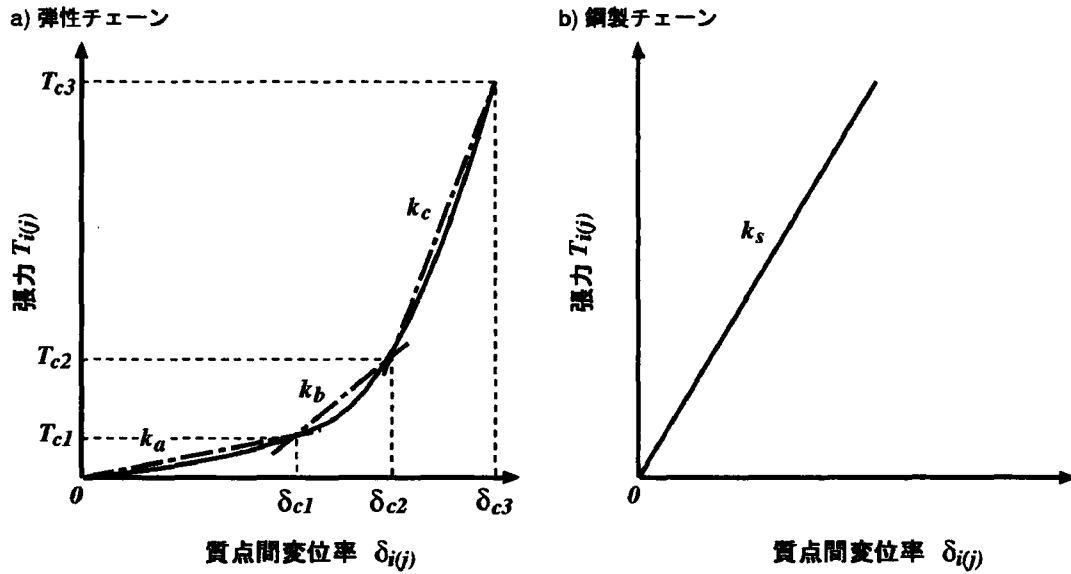


図 6. 2 質点間バネの変位率と張力の模式図

例えば、弾性チェーンの変位率-張力の特徴を図 6. 2a) に示すように3箇所の領域に分割すると、それぞれの領域におけるバネ定数 k_a , k_b , k_c は、式 (6. 14) として求めるものとする。

$$\left. \begin{aligned} k_a &= \frac{T_{c1}}{\delta_{c1}} \\ k_b &= \frac{(T_{c2} - T_{c1})}{(\delta_{c2} - \delta_{c1})} \\ k_c &= \frac{(T_{c3} - T_{c2})}{(\delta_{c3} - \delta_{c2})} \end{aligned} \right\} \quad (6. 14)$$

ここに、 T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} および δ_{c1} , δ_{c2} , δ_{c3} : 弾性チェーンの特性を三つの領域に分ける場合の分割点における張力と変位率である。よって、弾性チェーンを用いた場合の各質点間張力 $T_{i(j)}$ は、各質点間の係留索の変位率を $\delta_{i(j)}$ と表し、次式を用いて求めた。

$$T_{i(j)} = \begin{cases} k_a \delta_{i(j)} & : \delta_{i(j)} < \delta_{c1} \\ k_b (\delta_{i(j)} - \delta_{c1}) + T_{c1} & : \delta_{c1} \leq \delta_{i(j)} < \delta_{c2} \\ k_c (\delta_{i(j)} - \delta_{c2}) + T_{c2} & : \delta_{i(j)} \geq \delta_{c2} \end{cases} \quad (6.15)$$

一方、鋼製チェーンを用いた場合、図 6. 2b) に示したように変位率－張力の関係は線形性を示す。よって、そのバネ定数を k_s とすると、質点間の張力は式 (6. 16) のように表すことができる。

$$T_{i(j)} = k_s \delta_{i(j)} \quad (6.16)$$

なお、各質点の位置を計算したとき、その結果によって各質点間の距離が初期の質点間距離よりも短くなる場合があることが考えられる。このようなときは、弾性チェーンを使用した場合には圧縮による反発力が質点間に作用すると考えて張力を負値のまま計算を進める。また、鋼製チェーンを使用した場合は、チェーンリンク間が接触しない状態にあると考えて、質点間の張力を 0 として取り扱うものとする。

以上の方法によって、各質点間の張力を計算するとき、係留索に関する伸び－張力特性は実機の特性格得することができればそれが望ましいが、その特性を推定する必要がある場合、弾性チェーンに関しては 4. 3. 1 で説明したチェーンリンクの余裕率とゴム材の圧縮率から求めることができる。また、鋼製チェーンに関しては式 (6. 17) を用いて係留索の特性を推定すればよい⁷⁾。

$$\Delta l = (2 + 42.65\beta) \frac{PL_c}{\pi E d^2} \quad (6.17)$$

ここに、 Δl : 係留索（鋼製チェーン）の変位量、 β : 伸び係数、 L_c : チェーンの長さ、 P : 荷重、 E : 鉄のヤング率 (21500kgf/mm²) である。なお、伸び係数 β は、例えば呼び径 $\phi 60$ といった太い線径の場合 $\beta = 1.2$ のとき実際のチェーンの伸び量と計算伸び量の対応が良いことから、 $\beta = 1.2$ を用いるものとした。

6.2.4 係留系初期状態の計算

(1) 質点間初期張力の計算

この数値シミュレーションにおける係留系の初期条件は、弛緩係留状態（図 6.3）である。

このとき、質点間の初期張力 $T_{i(0)}$ は、係留索が海底面から立ち上がっている部分にのみ作用している。また、海底面に接している部分では、係留索の自重が海底面によって支持されているために初期張力は作用していないものと想定した。

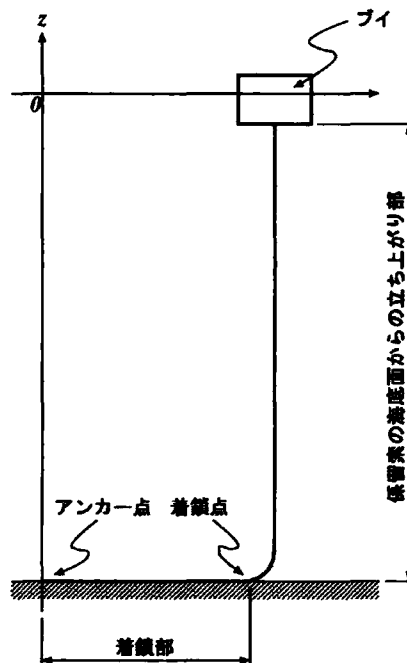


図 6.3 初期の係留状態

係留索の海底面から立ち上がっている部分には、係留索の自重によって初期張力が作用していると同時に、この張力によって係留索に伸びが生じている。特に、弾性チェーンを用いた場合には、そのばね定数が鋼製チェーンと比較して小さいために、自重による伸び量は大きな値となることが考えられる。また、チェーンの自重と伸び量によって、ブイの吃水、係留索の海底面からの立ち上がり部および着鎖部の長さが増える。そこで、ここでは、以下の方法を用いてこれらの値を求めた。

計算は、係留索のみが没水している状況を想定した時の係留索の水中重量 $\sum W_{wi}$ を求め、この値を用いて初期値となるブイの吃水 d_{r0} を求める。この値をもとに、収束計算によって計算対象とする係留系モデルにおけるブイの吃水 d_r 、および各質点間の初期張力 $T_{i(0)}$ を求める手順で行った。

まず、ブイの吃水の初期値 d_{r0} を求める。係留索モデルの各要素の長さを一様に ℓ_0 、係留索が海底面から立ち上がっている部分の高さを h_1 とする。まず、 h_1 を水深 h と等しいとし、 h_1 に位置する係留索の要素 ($i \geq 2$) に関して要素数 N_v を、以下のように求める。なお、 $\text{r.o.f}(x)$ は変数 x を四捨五入する関数を示す。

$$N_v = \text{r.o.f}\left(\frac{h_1}{\ell_0}\right) \quad (6.18)$$

次に、先に求めた要素 N_v 個の水中重量 $\sum_{i=2}^{N_v} W_{wi}$ を求め、ここで求めた N_v 個の水中重量とブイの質量 m_1 からブイの吃水の初期値 d_{r0} を式 (6.19) より求める。なお、式 (6.18) で求めた要素数は、 $N_{v0} = N_v$ として保存しておく。

$$d_{r0} = \frac{\sum_{i=2}^{N_v} W_{wi} + m_1 g}{\frac{\pi}{4} \rho g D_1^2} \quad (6.19)$$

ここに、 W_{wi} : 各質点の水中重量、 D_1 : ブイの直径である。

ブイ吃水の初期値が以上のようにして求めることができた。次に、ブイの吃水 d_{r0} を考慮して、ブイ底面から海底面までの距離 h_1 を $h_1 = h - d_{r0}$ とし、 h_1 に位置する要素数 N_v を再び式 (6.18) で求める。

ここで、上述のように求めた新たな要素数 N_v について、海底面から立ち上がっている部分の係留索の水中重量 $\sum_{i=2}^{N_v} W_{wi}$ を求める。次に、各要素の自重によって作用する質点間に作用する張力 $T_{i(0)}$ を式 (6.20) のようにして求める。

$$\left. \begin{aligned} T_{i(0)} &= \sum_{i=2}^{N_V} W_{wi} & : i=2 \\ T_{i(0)} &= T_{i-1(0)} - W_{w(i-1)} & : 2 < i \leq N_V \end{aligned} \right\} \quad (6.20)$$

また、初期張力が作用することによって係留索には伸び変位が生じているため、次の手順において、初期張力による係留索の変位量を求めなければならない。基本的には、先に述べたように、フックの法則を用いて初期張力から各質点間の伸び量を求めればよい。係留索の変位量 $\Delta l_{i(0)}$ は、各要素が弾性チェーンあるいは鋼製チェーンのいずれであるかによって、以下ようになる。

1) 要素が弾性チェーンの場合

係留索の要素が弾性チェーンの場合、そのバネ特性が非線形性を示すために図 6. 2a) のようにバネ特性を3領域に分割し、それぞれの領域におけるバネ定数 k_a , k_b , k_c を求める。各領域の分割点の変位率と張力を (δ_{c1}, T_{c1}) , (δ_{c2}, T_{c2}) 、各要素の初期長さを l_u とすると、各要素の変位量 $\Delta l_{i(0)}$ は、式 (6. 21) に示すようになる。

$$\Delta l_{i(0)} = \begin{cases} \frac{T_{i(0)}}{k_a} l_u & : T_{i(0)} \leq T_{c1} \\ \left\{ \frac{(T_{i(0)} - T_{c1})}{k_b} + \delta_{c1} \right\} l_u & : T_{c1} < T_{i(0)} \leq T_{c2} \\ \left\{ \frac{(T_{i(0)} - T_{c2})}{k_c} + \delta_{c2} \right\} l_u & : T_{i(0)} > T_{c2} \end{cases} \quad (6.21)$$

2) 要素が鋼製チェーンの場合

係留索の要素が鋼製チェーンの場合、係留索のバネ特性は線形性が強い。したがって、係留索の初期変位量は以下のように求める。

$$\Delta l_{i(0)} = \frac{T_{i(0)}}{k_s} l_u \quad (6.22)$$

式 (6. 21) あるいは (6. 22) によって各要素の伸び量を求めた後、再度、伸び量を考慮した場

合における水深中に鉛直方向に存在する要素数を求め、これを新たな N_v としてブイの吃水 d_{r1} を式 (6. 19) と同様にして求め、 N_v 個目の要素が海底面と交わることをない値を計算し、これを海底面から鉛直方向に立ち上がっている係留索の要素数とする。

(2) 各質点の初期座標の計算

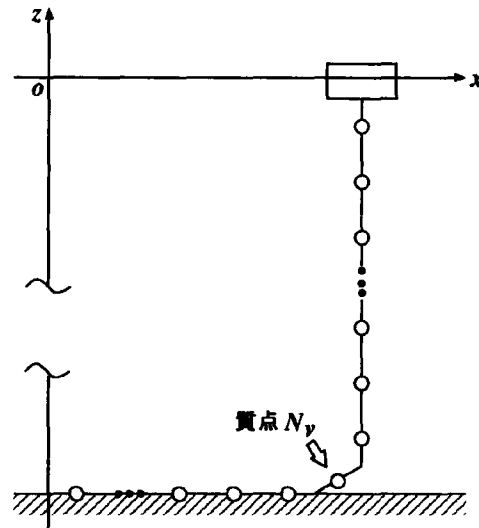
各質点間の初期張力 $T_{i(0)}$ と初期変位量 $\Delta l_{i(0)}$ を求めると、各質点の初期座標 $(x_{i(0)}, z_{i(0)})$ を求めることができる。各質点の初期座標は、水平座標 $x_{i(0)}$ はアンカーからブイ点へ向けて、一方、鉛直座標 $z_{i(0)}$ はブイ点からアンカーへ向けて計算を行う。

初期座標の計算は、まず鉛直方向座標から行うものとする。この計算モデルでは、係留系の初期条件は、係留索が弛緩状態となっていることとしている。よって、アンカー一点から式 (6. 18) で求めた質点の次、すなわち $N_v + 1$ 番の質点までは海底面にある状態となっている。ゆえに、 $N_v < i \leq n$ の範囲では各質点の自重は海底面によって支持されているとすると、鉛直方向座標 $z_{i(0)}$ は式 (6. 23) を用いて求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} z_{i(0)} &= 0 & (i=1) \\ z_{2(0)} &= z_{1(0)} - \left(d_r + \frac{l_{2(0)}}{2} + \Delta l_{2(0)} \right) & (i=2) \\ z_{i(0)} &= z_{i-1(0)} - (l_{i(0)} + \Delta l_{i(0)}) & (2 < i \leq N_v) \\ z_{i(0)} &= -h & (N_v < i \leq n) \end{aligned} \right\} \quad (6. 23)$$

次に、水平方向座標はアンカー一点からブイへと計算を行い、質点 N_v では図 6. 4 に示した状態となっていることを考慮すると式 (6. 24) を用いて求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} x_{n(0)} &= 0 & (i=n) \\ x_{n-1(0)} &= x_{n(0)} + \frac{l_{i(0)}}{2} & (i=n-1) \\ x_{i(0)} &= x_{i+1(0)} + \sqrt{l_{i(0)}^2 - (z_{i(0)} + h)^2} & (N_v \leq i < n-1) \\ x_{i(0)} &= x_{i+1(0)} & (1 \leq i < N_v-1) \end{aligned} \right\} \quad (6. 24)$$

図 6.4 質点 N_v の状態

6.2.5 水面形・水粒子の運動および質点に作用する流体力の計算

(1) 水面形と水粒子の速度・加速度の計算

係留系の初期状態が求まると、これに波を作用させて微小時間 Δt ごとの各質点の加速度、速度、および各質点の位置と質点間張力を求めることができる。

各質点の運動は式 (6. 1), (6. 2) で表される流体力 $F_{Hi(j)}$ および $F_{Vi(j)}$, 各質点の浮力 $f_{i(j)}$, そして各質点間の張力 $T_{i(j)}$ を用い, 運動方程式 (6. 6), (6. 7) を解くことによって求められる。このうち, 流体力を求めるためには波の水面形と水粒子の運動を求めなければならない。水面形と水粒子の運動を求めるためには, 微小振幅波理論あるいは有限振幅波理論のいずれかを用いればよいが, ここでは, 有限振幅波理論の一つである Stokes 波の 4 次近似を用いるものとする。これは, 航路標識ブイなどの小型の浮体構造物は, 一般に比較的水深の浅い海域に設置されることが多いことを考慮したためである。

水面形 η , 水粒子の速度 u , w , 水粒子の加速度 \dot{u} , \dot{w} , および波速は Stokes 波の 4 次近似を用いると以下のように表される⁸⁾。

$$\begin{aligned}
k\eta = & ak \cos(kx - \sigma t) + (a^2 k^2 B_{22} + a^4 k^4 B_{24}) \cos 2(kx - \sigma t) \\
& + a^3 k^3 B_{33} \cos 3(kx - \sigma t) + a^4 k^4 B_{44} \cos 4(kx - \sigma t)
\end{aligned} \quad (6.25)$$

ここに a は、波の峰から x 軸までの高さを表すパラメーターである。

$$\begin{aligned}
u/c = & \left. \begin{aligned} & a^2 k^2 A_{02} + a^4 k^4 A_{04} + (akA_{11} + a^3 k^3 A_{13}) \cosh k(h+z) \cos(kx - \sigma t) \\ & + 2(a^2 k^2 A_{22} + a^4 k^4 A_{24}) \cosh 2k(h+z) \cos 2(kx - \sigma t) \\ & + 3a^3 k^3 A_{33} \cosh 3k(h+z) \cos 3(kx - \sigma t) \\ & + 4a^4 k^4 A_{44} \cosh 4k(h+z) \cos 4(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\} \\
w/c = & \left. \begin{aligned} & (akA_{11} + a^3 k^3 A_{13}) \sinh k(h+z) \sin(kx - \sigma t) \\ & + 2(a^2 k^2 A_{22} + a^4 k^4 A_{24}) \sinh 2k(h+z) \sin 2(kx - \sigma t) \\ & + 3a^3 k^3 A_{33} \sinh 3k(h+z) \sin 3(kx - \sigma t) \\ & + 4a^4 k^4 A_{44} \sinh 4k(h+z) \sin 4(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\}
\end{aligned} \quad (6.26)$$

ここに c は次式で求まる。

$$\frac{c^2}{gh} = \frac{\tanh kh}{kh} (1 + a^2 k^2 C_1) \quad (6.27)$$

また、水粒子の加速度は式 (6.26) を t で微分して式 (6.28) のように求める。

$$\begin{aligned}
\dot{u}/c = & \left. \begin{aligned} & \sigma (akA_{11} + a^3 k^3 A_{13}) \cosh k(h+z) \sin(kx - \sigma t) \\ & + 4\sigma (a^2 k^2 A_{22} + a^4 k^4 A_{24}) \cosh 2k(h+z) \sin 2(kx - \sigma t) \\ & + 9\sigma a^3 k^3 A_{33} \cosh 3k(h+z) \sin 3(kx - \sigma t) \\ & + 16\sigma a^4 k^4 A_{44} \cosh 4k(h+z) \sin 4(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\} \\
\dot{w}/c = & \left. \begin{aligned} & -\sigma (akA_{11} + a^3 k^3 A_{13}) \sinh k(h+z) \cos(kx - \sigma t) \\ & - 4\sigma (a^2 k^2 A_{22} + a^4 k^4 A_{24}) \sinh 2k(h+z) \cos 2(kx - \sigma t) \\ & - 9\sigma a^3 k^3 A_{33} \sinh 3k(h+z) \cos 3(kx - \sigma t) \\ & - 16\sigma a^4 k^4 A_{44} \sinh 4k(h+z) \cos 4(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\}
\end{aligned} \quad (6.28)$$

ここに、 A 、 B 、 C は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
A_{02} &= 0 \\
A_{04} &= 0 \\
A_{11} &= \frac{1}{\sinh kh} \\
A_{13} &= -\frac{(5 \cosh^2 kh + 1) \cosh^2 kh}{8 \sinh^5 kh} - \frac{A_{02}}{\sinh kh} \\
A_{22} &= \frac{3}{8 \sinh^4 kh} \\
A_{24} &= \frac{192 \cosh^8 kh - 424 \cosh^6 kh - 312 \cosh^4 kh + 480 \cosh^2 kh - 17}{768 \sinh^{10} kh} - \frac{3A_{02}}{8 \sinh^4 kh} \\
A_{33} &= \frac{-4 \cosh^2 kh + 13}{64 \sinh^7 kh} \\
A_{44} &= \frac{80 \cosh^6 kh - 816 \cosh^4 kh + 1338 \cosh^2 kh - 197}{1536(-1 + 6 \cosh^2 kh) \sinh^{10} kh}
\end{aligned} \tag{6.29}$$

$$\begin{aligned}
B_{22} &= \frac{(2 \cosh^2 kh + 1) \cosh kh}{4 \sinh^3 kh} \\
B_{24} &= \frac{272 \cosh^4 kh - 504 \cosh^7 kh - 192 \cosh^5 kh + 322 \cosh^2 kh + 21 \cosh kh}{384 \sinh^9 kh} \\
B_{33} &= \frac{24 \cosh^6 kh + 3}{64 \sinh^6 kh} \\
B_{44} &= \frac{768 \cosh^{11} kh - 448 \cosh^9 kh - 48 \cosh^7 kh + 48 \cosh^5 kh + 106 \cosh^3 kh - 21 \cosh kh}{8 \sinh^4 kh}
\end{aligned} \tag{6.30}$$

$$\begin{aligned}
C_0^2 &= g \tanh kh \\
C_1 &= \frac{8 \cosh^4 kh - 8 \cosh^2 kh + 9}{8 \sinh^4 kh} + 2A_{02} \\
C_3 &= -\frac{1}{4 \sinh kh \cosh kh} + \frac{\sinh kh}{\cosh kh} A_{02} \\
C_4 &= \frac{4 \cosh^6 kh + 16 \cosh^4 kh - 38 \cosh^2 kh + 9}{64 \sinh^7 kh \cosh kh} + \frac{8 \cosh^4 kh - 8 \cosh^2 kh + 9}{8 \sinh^3 kh \cosh kh} A_{02} \\
&\quad + \frac{3 \sinh kh}{\cosh kh} A_{02}^2 + \frac{\sinh kh}{\cosh kh} A_{04}
\end{aligned} \tag{6.31}$$

$$\begin{aligned}
A_{02} &= -\frac{\cosh kh}{2kh \sinh kh} \\
A_{03} &= \frac{4 \cosh^4 kh - 20 \cosh^5 kh + 16 \cosh^3 kh - 9 \cosh kh}{32kh \sinh^7 kh} + \left(\frac{\cosh kh}{2kh \sinh kh} \right)^2
\end{aligned} \tag{6.32}$$

以上の式 (6. 25) ~ (6. 32) を用いて水面形, 水粒子の速度・加速度を求めるためには, 波の峰を表すパラメーター a を求める必要がある. 式 (6. 25) において a は未知数であるから, この式から直接的に a を求めることはできない. そこで, Stokes 波の 3 次近似を参考に以下のような操作を行う⁹⁾.

Stokes 波は図 6. 5 に示すような水面形となる. ここで, 波峰および波谷にあたる水位をそれぞれ η_{\max} , η_{\min} とおくと, 波高 H は,

$$H = \eta_{\max} - \eta_{\min} \quad (6. 33)$$

となる. η_{\max} は $\cos(kx - \sigma t) = 1$, η_{\min} は $\cos(kx - \sigma t) = -1$ のときの値であるから, η_{\max} および η_{\min} は式 (6. 25) より,

$$\left. \begin{aligned} k\eta_{\max} &= ak + (a^2 k^2 B_{22} + a^4 k^4 B_{24}) + a^3 k^3 B_{33} + a^4 k^4 B_{44} \\ k\eta_{\min} &= -ak + (a^2 k^2 B_{22} + a^4 k^4 B_{24}) - a^3 k^3 B_{33} + a^4 k^4 B_{44} \end{aligned} \right\} \quad (6. 34)$$

として表される. そして, 式 (6. 34) を式 (6. 33) に代入すると, 波高 H は式 (6. 35) となる.

$$kH = 2ak + 2a^3 k^3 B_{33} \quad (6. 35)$$

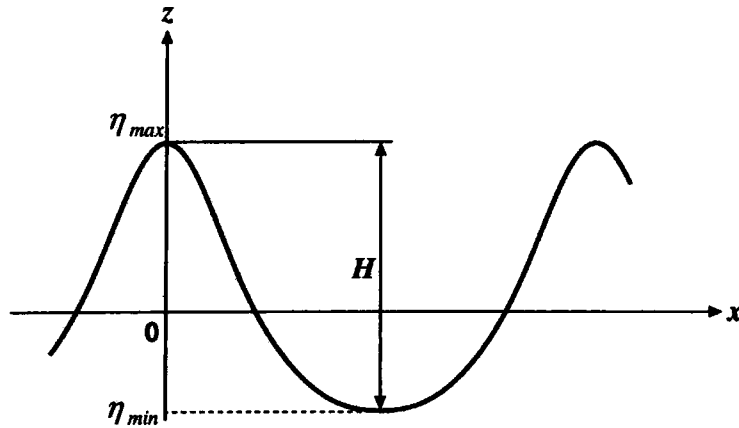


図 6. 5 Stokes 波の波形

これらの式を用いて水面形や水粒子速度を求めるためには, 波長 L および振幅 a を求めなければならない. L と a を求める方法としては Newton 法と二分法を用いる方法¹⁰⁾や, 式

(6.35) にカルダノ法を用いて振幅を解く方法が考えられる。ここでは、カルダノ法を用いた方法で振幅 a 、波長 L を求めた。

振幅と波長を求めるために、まず、波速 c を表す式 (6.27) の左辺を波長が含まれる形として次式のように変形する。

$$\frac{L^2}{gT^2} = \frac{1}{k} \tanh kh \left\{ 1 + a^2 k^2 \left(\frac{8 \cosh^4 kh - 8 \cosh^2 kh + 9}{8 \sinh^4 kh} - \frac{\cosh kh}{kh \sinh kh} \right) \right\} \quad (6.36)$$

さらに、式 (6.36) から波長 L を $L = 2\pi/k$ とおいて消去し、

$$k = \frac{4\pi^2}{gT^2} \frac{1}{\tanh kh \left\{ 1 + a^2 k^2 \left(\frac{8 \cosh^4 kh - 8 \cosh^2 kh + 9}{8 \sinh^4 kh} - \frac{\cosh kh}{kh \sinh kh} \right) \right\}} \quad (6.37)$$

と変型する。

次に、式 (6.37) に関して、波数の近似値の初期値として

$$k = \frac{4\pi^2}{gT^2} \quad (6.38)$$

を求める。この波数を式 (6.35) に代入し、カルダノ法によって a に関する3次方程式を解いて a の値を実数として求める。求められた a の値と波数を再度、式 (6.37) の右辺に代入して、波数 k を求める。この波数を再び式 (6.35) に代入し、カルダノ法を用いて a を求める。このような繰り返し計算を行ない、 a と波数 k の値を十分な精度で計算する。 a と波数 k が求めれば、これらを式 (6.36) に代入して波長 L を求めることができる。

また、Stokes 波を用いて係留索の検討を行う際、ブイの初期位置 $x_{1(0)}$ において水位が0となるように係留系に対して波を作用させた方が後の計算にとって都合が良い。これを行うためには、図 6.6 の点線で示すように、式 (6.25) で示した水面形に関して、 $t=0$ で $\eta=0$ となるブイの位置 x_p を求める。そして、式 (6.25)、(6.26) および式 (6.28) の $kx - \sigma t$ を $k(x + x_p - x_1) - \sigma t$ とおけばよい。

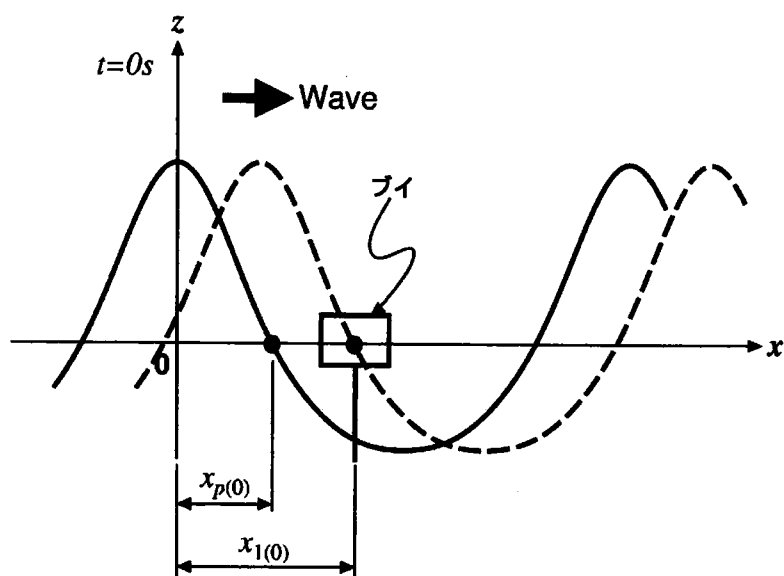


図 6.6 係留系に作用させる Stokes 波

x_p を求めるためには、図 6.7 に示すように $x=0$ から $L/2$ の区間において微小な距離 dx を設定し、図中の x_0 から $x_{L/2}$ に向かって順次 η を計算し、 η が正から負に変化する x_m の値を求め、その後、 x_{m-1} から x_m の区間において比例配分を行うことにより x_p を求める方法を用いた。

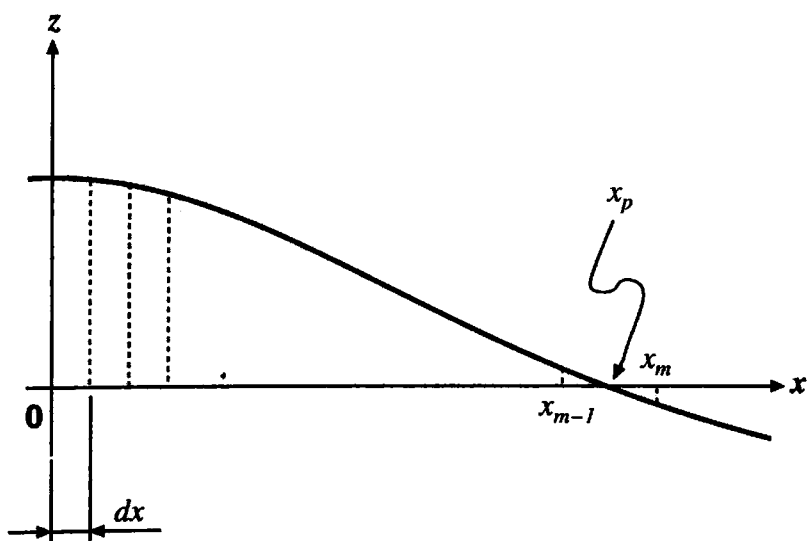


図 6.7 x_p の計算方法

なお、係留索の運動を求める際、計算の初期の段階において係留系に対して大きな波高の波が急激に入射すると、後の計算結果が不安定となる懸念がある。そこで、計算の対象とする波高 H に到達するまでの時間 t_H を設定することによって与えられる波高増加パラメーター α を導入する。そして、 α を式 (6.25)、式 (6.26) および式 (6.28) の右辺に乘じるものとする。

波高増加パラメーター α は、計算時刻 t と t_H の比として、式 (6.39) のように定義する。よって、計算時刻が t_H に達すれば、 $\alpha = 1$ となり、計算対象とした波高で計算を継続することとなる。

$$\alpha = \begin{cases} \frac{t}{t_H} & (t < t_H) \\ 1 & (t \geq t_H) \end{cases} \quad (6.39)$$

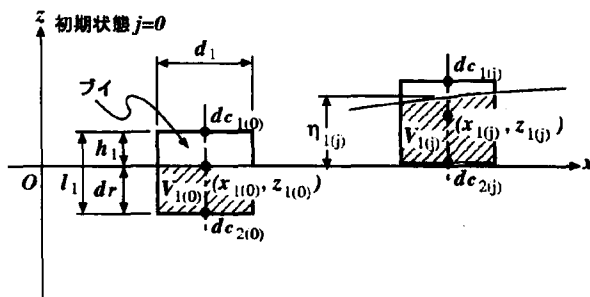
(2) 各質点の投影面積と浮力の計算

水粒子の運動によって各質点に働く流体力を求めるためには、各質点の水平および鉛直方向の投影面積 $A_{xi(j)}$, $A_{zi(j)}$ を求めておく必要がある。また、各質点の運動方程式には浮力 $f_{i(j)}$ が含まれることから各計算時刻毎にこれを求めるため、各質点の体積 $V_{i(j)}$ を求めなければならない。

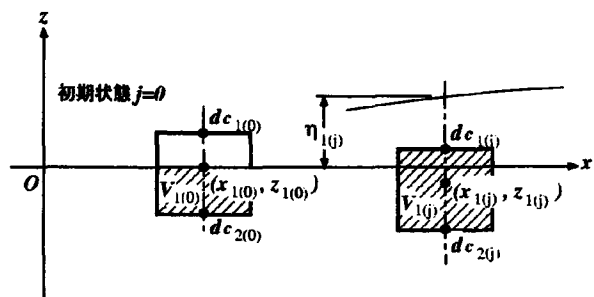
この計算で対象とするモデルはブイが係留索で一点係留された状態である。よって、まず、ブイの投影面積と浮力を求め、順次、係留索を構成する質点の投影面積と浮力を求めるものとする。

まず、ブイの投影面積 $A_{xi(j)}$, $A_{zi(j)}$ と没水部の体積 $V_{i(j)}$ は係留索の張力と水面形の影響により、各計算時間毎に変化する。例えばこの変化は、図 6.8 に示した三種類の状態が考えられる。

1) 水面がブイの上面から底面の間に存在するとき



2) ブイが完全に没水するとき



3) ブイが水面から離れるとき

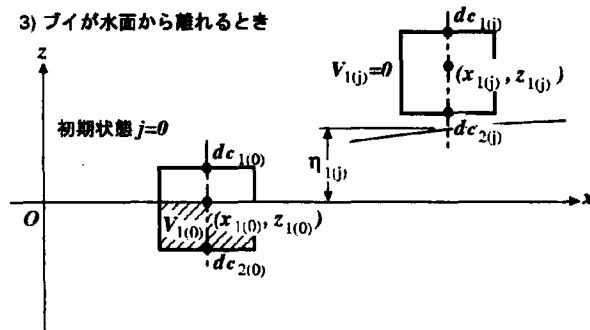


図 6.8 ブイ没水部の状態

図 6.8 の 1) ~ 3), それぞれの状態の判別を行う値として, ブイの上面と底面における鉛直方向座標 $d_{c1(j)}$ と $d_{c2(j)}$, そしてブイ位置における水面形 $\eta_{1(j)}$ を用いる. $d_{c1(j)}$ および $d_{c2(j)}$ は, 時刻 $j-1$ におけるブイの鉛直方向座標 $z_{1(j-1)}$ と初期状態におけるブイの乾舷 h_1 , 喫水 d_r を用いて式 (6.40) のように表される.

$$\left. \begin{aligned} d_{c1(j)} &= z_{1(j-1)} + h_1 \\ d_{c2(j)} &= z_{1(j-1)} - d_r \end{aligned} \right\} \quad (6.40)$$

以上のようにして求めた $d_{c1(j)}$, $d_{c2(j)}$ と $\eta_{1(j)}$ を用いて, ブイの投影面積 $A_{x1(j)}$, $A_{z1(j)}$ およびブイの没水部体積 $V_{1(j)}$ は以下のように表される.

- 1) 水面がブイの上面と底面の間に存在するとき ($d_{c2(j)} < \eta_{1(j)} < d_{cl(j)}$)

$$\left. \begin{aligned} V_{1(j)} &= V_{1(0)} + \left\{ \frac{\pi}{4} D_1^2 (\eta_{1(j)} - z_{1(j-1)}) \right\} \\ A_{x1(j)} &= A_{x1(0)} + D_1 (\eta_{1(j)} - z_{1(j-1)}) \\ A_{z1(j)} &= \frac{\pi}{4} D_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.41)$$

ここに, D_1 : ブイの直径 (一定値) である.

- 2) ブイが完全に没水するとき ($\eta_{1(j)} > d_{cl(j)}$)

$$\left. \begin{aligned} V_{1(j)} &= \frac{\pi}{4} D_1^2 l_1 \\ A_{x1(j)} &= D_1 l_1 \\ A_{z1(j)} &= \frac{\pi}{4} D_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.42)$$

ここに, l_1 : ブイの高さ (一定値) である. なお, $l_1 = h_1 + d_r$ である.

- 3) ブイが水面から離れるとき ($d_{c2(j)} \geq \eta_{1(j)}$)

$$\left. \begin{aligned} V_{1(j)} &= 0 \\ A_{x1(j)} &= 0 \\ A_{z1(j)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.43)$$

次に, 係留索部分の投影面積 $A_{x1(j)}$, $A_{z1(j)}$ を求めなければならない. 係留索部分の投影面積の計算方法は, 図 6.9 の 1) ~ 3) の各部分で異なる. それぞれの部分における投影面積は以下のように表される.

- 1) ブイ ~ 質点 $i = 2$

この部分の質点の投影面積 $A_{x2(j)}$, $A_{z2(j)}$ は, ブイと係留索の接点 $(x_{u(j)}, z_{u(j)})$ を起点として求める. $(x_{u(j)}, z_{u(j)})$ は, ブイの初期喫水 d_r から,

$$\left. \begin{aligned} x_{u(j-1)} &= x_{1(j-1)} \\ z_{u(j-1)} &= z_{1(j-1)} - d_r \end{aligned} \right\} \quad (6.44)$$

とする。ここで、係留索の直径を D_2 とすると、投影面積 $A_{x2(j)}$, $A_{z2(j)}$ は、式 (6.45)

のように求める。

$$\left. \begin{aligned} A_{x2(j)} &= \left(\left| z_{u(j-1)} - z_{2(j-1)} \right| + \frac{|z_{2(j-1)} - z_{3(j-1)}|}{2} \right) D_2 \\ A_{z2(j)} &= \left(\left| x_{u(j-1)} - x_{2(j-1)} \right| + \frac{|x_{2(j-1)} - x_{3(j-1)}|}{2} \right) D_2 \end{aligned} \right\} \quad (6.45)$$

2) 係留索の中間部

係留索の直径を D_i とすると、投影面積 $A_{xi(j)}$, $A_{zi(j)}$ は、式 (6.46) となる。

$$\left. \begin{aligned} A_{xi(j)} &= \left(\frac{|z_{i-1(j-1)} - z_{i(j-1)}|}{2} + \frac{|z_{i(j-1)} - z_{i+1(j-1)}|}{2} \right) D_i \\ A_{zi(j)} &= \left(\frac{|x_{i-1(j-1)} - x_{i(j-1)}|}{2} + \frac{|x_{i(j-1)} - x_{i+1(j-1)}|}{2} \right) D_i \end{aligned} \right\} \quad (6.46)$$

3) アンカー付近

係留索の直径を D_{n-1} とすると、投影面積 $A_{xn-1(j)}$, $A_{zn-1(j)}$ は、式 (6.47) となる。

$$\left. \begin{aligned} A_{xi(j)} &= \left(\frac{|z_{n-2(j-1)} - z_{n-1(j-1)}|}{2} + |z_{n-1(j-1)} - z_{n(j-1)}| \right) D_{n-1} \\ A_{zi(j)} &= \left(\frac{|x_{n-2(j-1)} - x_{n-1(j-1)}|}{2} + |x_{n-1(j-1)} - x_{n(j-1)}| \right) D_{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (6.47)$$

なお、アンカー一点 $i = n$ の座標は、計算時刻に係わらず不変としている。

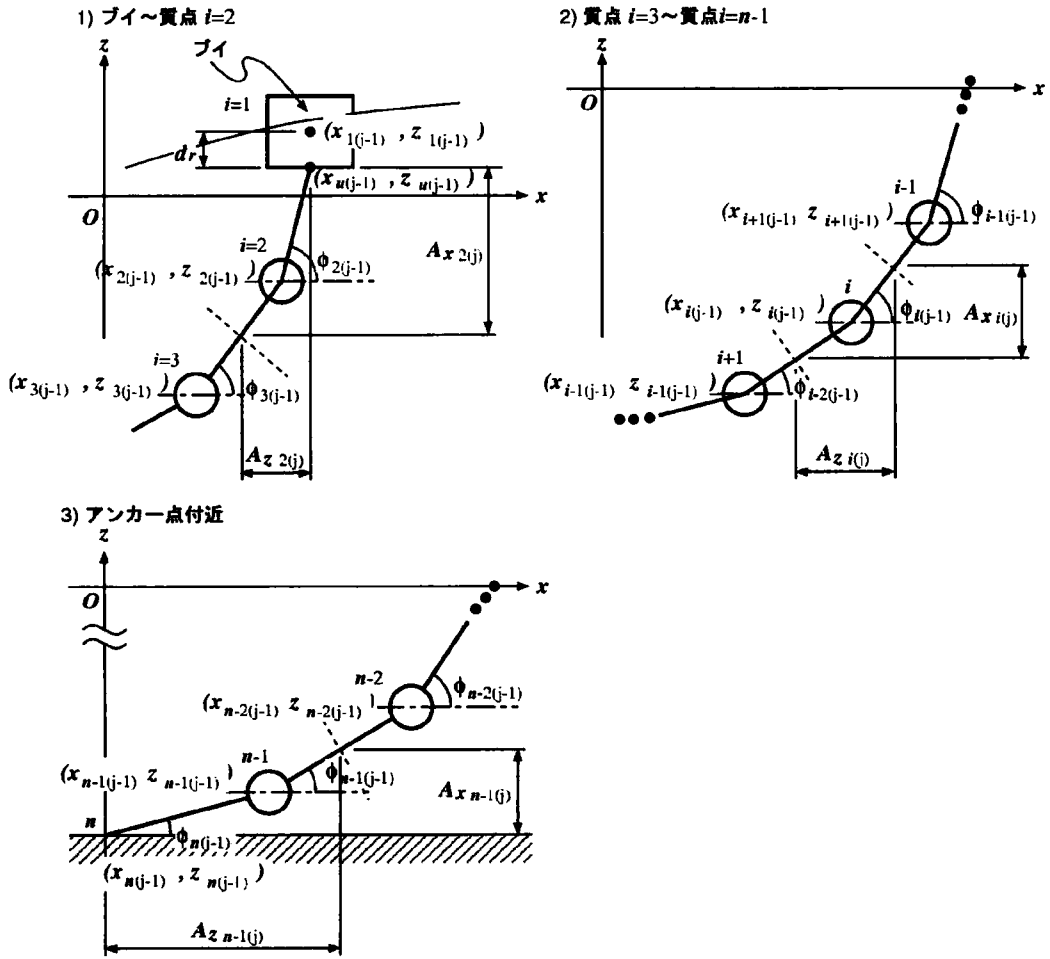


図 6.9 係留索部分質点の投影面積

係留索の鉛直に平行な面に対する投影面積を求める際、各質点のなす角 $\phi_{i(j)}$ を用いる。これは、各質点の位置から式(6.48)に示したように扱う。

$$\left. \begin{aligned} \cos \phi_{i(j-1)} &= \frac{x_{i-1(j-1)} - x_{i(j-1)}}{l_{i(j-1)}}, & \sin \phi_{i(j-1)} &= \frac{z_{i-1(j-1)} - z_{i(j-1)}}{l_{i(j-1)}} \\ \cos \phi_{i+1(j-1)} &= \frac{x_{i(j-1)} - x_{i+1(j-1)}}{l_{i+1(j-1)}}, & \sin \phi_{i+1(j-1)} &= \frac{z_{i(j-1)} - z_{i+1(j-1)}}{l_{i+1(j-1)}} \end{aligned} \right\} \quad (6.48)$$

また、係留索部分の体積は、伸びが生じた場合でも不変であると仮定し、式(6.49)に示したように扱うものとする。

$$V_{i(j)} = V_{i(0)} \quad (6.49)$$

6.2.6 海底面に接する質点の加速度・速度の取り扱い

この計算モデルでは、係留索が弛緩状態にあるときも計算条件に含めている。この場合、各質点が海底面に接しているか否かの判定、質点が海底面に接した場合の鉛直方向の位置、加速度および速度に関する処理が必要となる（図 6. 10）。

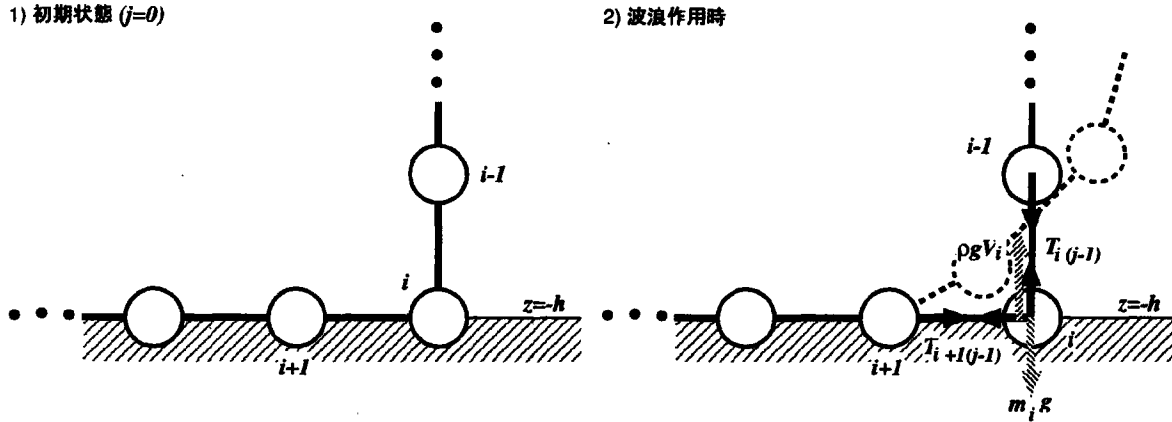


図 6. 10 質点の海底面との接触

計算時刻 j において、質点に作用している鉛直方向の力 $T_{vi(j)}$ は、各質点に作用している張力 $T_{i(j-1)}$ と $T_{i+1(j-1)}$ の鉛直方向の差 $T_{si(j)}$ と、その浮力と自重の差 $G_{vi(j)}$ を用いて以下のように求める。

$$\left. \begin{aligned} T_{vi(j)} &= T_{si(j)} + G_{vi(j)} \\ T_{si(j)} &= T_{i(j-1)} \sin \phi_{i(j-1)} - T_{i+1(j-1)} \sin \phi_{i+1(j-1)} \\ G_{vi(j)} &= \rho g V_{i(j)} - m_i g \end{aligned} \right\} \quad (6.50)$$

$z_{i(j)} \leq -h$ かつ $T_{vi(j)} < 0$ の場合、質点は海底面に沈下する方向に移動することになる。しかしながら、この計算モデルでは係留索の海底面への沈下は考慮していないので、質点は海底面に留まった状態となる。よって、この場合、計算時刻 j における質点の鉛直方向の加速度、速度、および位置を式 (6.51) のように表す。

$$\ddot{z}_{i(j)} = 0, \dot{z}_{i(j)} = 0, z_{i(j)} = -h \quad (6.51)$$

一方, $T_{vi(j)} \geq 0$ の場合, 質点は鉛直上向きに移動する成分を持つ. このときは, 式 (6. 6), (6. 7) で求められた質点の鉛直方向加速度, 式 (6. 12) で求められた質点の速度を次の時刻 $j+1$ のために保存し, 式 (6. 13) で求められた質点の位置から計算時刻 j における質点間張力 $T_{i(j)}$ を求めれば良い.

以上の手順によって, 計算時刻 j の各質点の加速度, 速度, および質点間張力が求められ, 次の時刻に移り, 前の計算結果を利用して $j+1$ におけるそれぞれの値を計算し, これを繰り返せばよい. 説明した係留索の運動および張力の計算手順を図 6. 11 にまとめた.

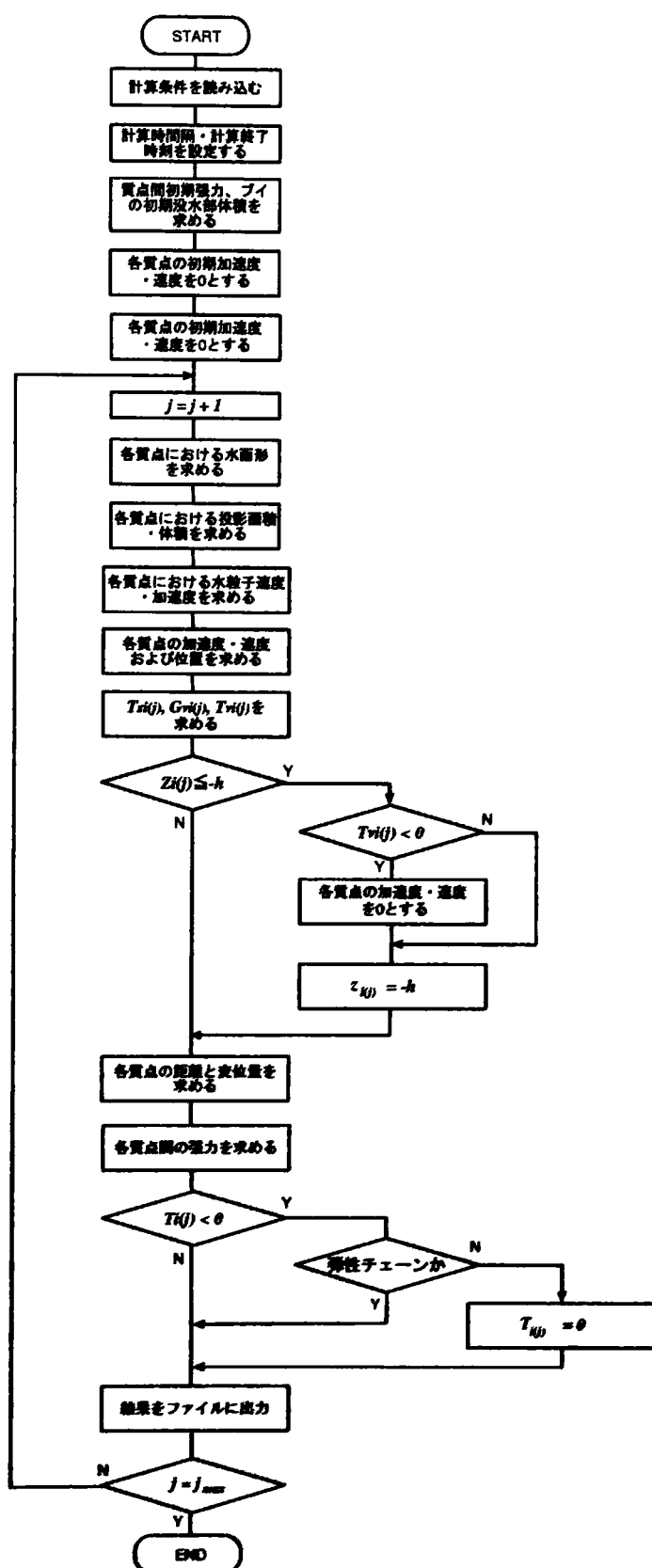


図 6.11 係留索の運動および張力計算のフローチャート

6.3 水理模型実験結果と計算結果の比較

6.3.1 水理模型実験の概要

ここでは、前節で説明した係留索の伸び量を考慮した係留索張力の計算方法について、水理模型実験の結果と比較し、その計算方法の妥当性について検討を行う。

比較する水理模型実験は、係留ブイの衝撃張力低減方法について平石ら²⁾によって行われた水理模型実験の結果である。この実験は、離島港湾における係船ブイ等を係留したチェーンに発生する衝撃張力の低減方法を検討するために行なわれたものである。実験は、水深30mの海域に係留ライン長35mで係留されたブイを対象とした実験である。

この実験では鋼製チェーンのみの場合とバネと長さの異なる弾性チェーンを用いた実験が行なわれたが、ここでは鋼製チェーンにより係留されたブイを想定した実験ケースと計算結果を比較するものとした。これは、比較的バネ定数の大きな鋼製チェーンの方が衝撃張力の発生が顕著であり、計算結果も不安定になりやすいことが予想されたことから、計算プログラムの検証にも適していると判断したためである。

6.3.2 計算条件

計算対象としたモデルは、平石らの実験に用いられた模型のプロトタイプを参考に図6.12に示したものとした。ブイは、直径 $d_1=3.6\text{m}$ 、高さ1.5m、質量10.0tonの係船ブイとし、これを呼び径 $\phi 60\text{mm}$ (JIS F 3303 第2種)、長さ35mの鋼製チェーンを用いて、水深 $h=30\text{m}$ の海域に弛緩係留した状態とした。なお、計算モデルにおいて係留索は長さ1mの要素として表わし、鋼製チェーンのばね特性は、式(6.17)を用いて推定したものとした。また、鋼製チェーンの抗力係数 C_D および質量係数 C_M は、流れの中に置いた円柱の値 $C_D=2.4$ 、 $C_M=1.2$ を用いるものとした。

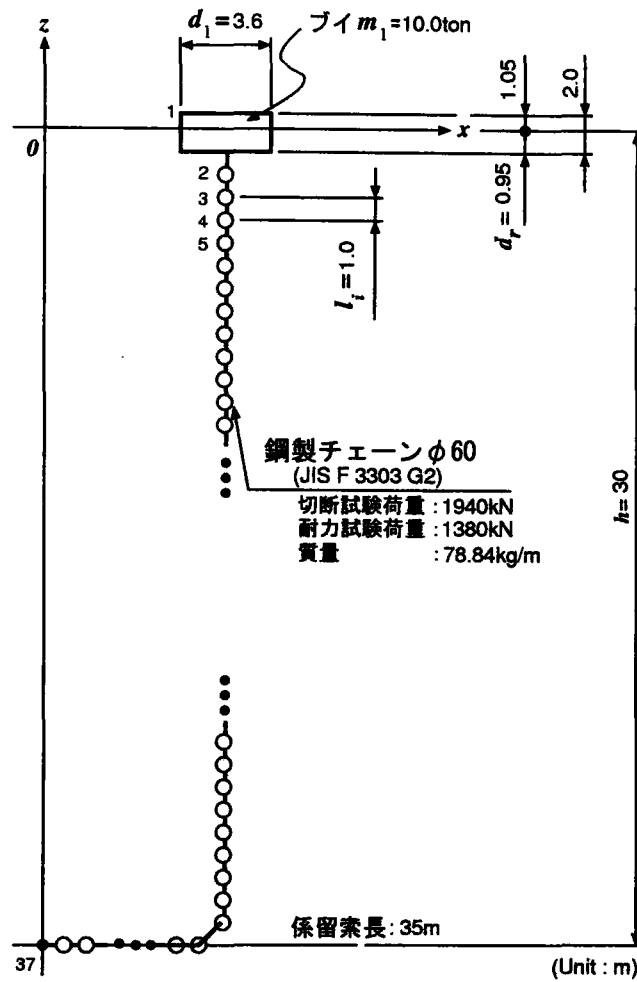


図 6.12 計算モデル

係留系に入射させる波は平石らの実験では一方向不規則波が用いられたが、ここで開発した計算方法は規則波を対象としたものである。そこで、平石らの係留索張力の計算方法²⁾では最大張力の推定には $H_{1/100}$ を、そして平均ピーク張力の推定には $H_{1/40}$ が用いられたことから、この計算においても係留索に発生する張力の比較において係留索に発生する最大張力と平均ピーク張力の評価に用いる波高は、実験で用いられた有義波高 $H_{1/3}$ から Rayleigh 分布の確率密度関数から求めるものとし、式(6.52)を用いて $H_{1/40}$ 、 $H_{1/100}$ 、つまり、 $N=40$ および100の場合を計算し、これらの値を用いるものとした。ここで開発した計算方法の検証に用いた波条件を表6.1に示すものとした。

$$\frac{H_{1/N}}{H_{1/3}} = \frac{1}{1.597} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln N} \quad (6.52)$$

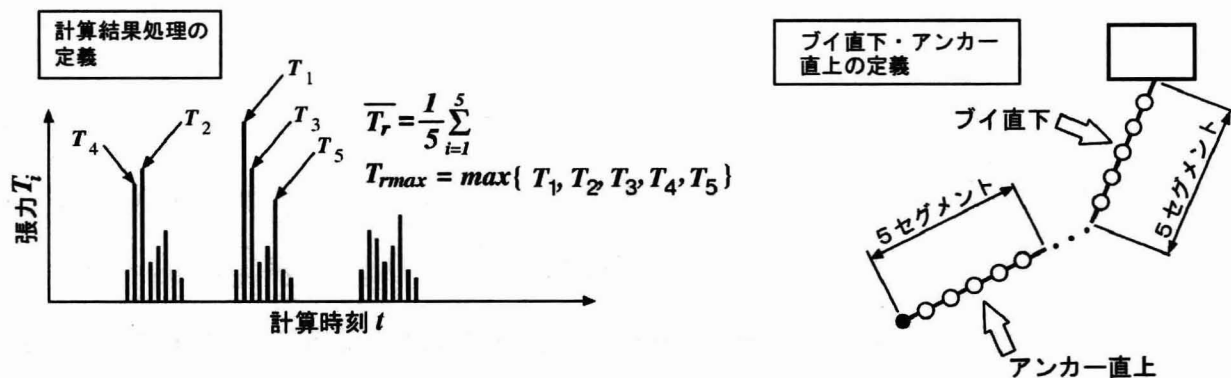
表 6.1 係留系に入射させる波条件

波高 $H_{1/3}$	周期 $T_{1/3}$	波長 L
6 ~ 10m	9.9 ~ 13.4s	134 ~ 213m

6.3.3 係留索張力の評価方法

数値計算によって求められた各要素において発生する張力は、比較対象とした実験における発生張力の評価方法を参考に、ブイ側およびアンカー側に発生する最大張力 $T_{r,max}$ と平均ピーク張力 \bar{T}_r を用いて、実験値と数値計算による発生張力を比較するものとした。

計算値の最大張力 $T_{r,max}$ および平均ピーク張力 \bar{T}_r は、図 6.13 に示すように、ブイ側およびアンカー側からそれぞれ 5 個の要素を選択し、計算された各要素における張力について値の大きなものから順に並べ替えを行い、その最大値を $T_{r,max}$ 、最大値から 5 つの値についての平均を求めた値を平均ピーク張力 \bar{T}_r とした。

図 6.13 最大張力 $T_{r,max}$ および平均ピーク張力 \bar{T}_r

6.3.4 計算時間に関する検討

先に述べたように、ここで用いる計算方法は衝撃的な張力を対象としており、浮体の波浪による漂流の影響によってモデルにおける計算時間が短い場合、計算時間の長い場合と比較して発生張力を小さく見積もってしまうことが考えられる。そこで、安定した発生張力が得ることができる、モデルにおける計算時間を検討した。

図 6.14 は、モデルにおける計算時間を 60～180s としたときのそれぞれの計算時間における発生張力を比較したものである。この図より、モデルにおける計算時間が 60～120s において安定しはじめ、120s を超えると発生張力にほとんど変化が見られなくなる結果を示している。

このことから、モデルにおける計算時間を少なくとも 120s 以上とすれば安定した計算結果が得られることがわかる。また、計算時刻の刻み幅 Δt も 5×10^{-7} s 以下の値でなければ、計算が不安定になる現象も見られた。これは、係留索の非線形なバネ特性を 3 区間に別けて直線近似していることによる変曲点周辺での張力の急変や、収束計算を用いる場合に起こりうる解の発散を防ぐために時刻 j における各質点加速度・速度や質点間に働く張力の計算に時刻 $j-1$ の値を用いたことにより、十分に短い刻み幅としなければならない。

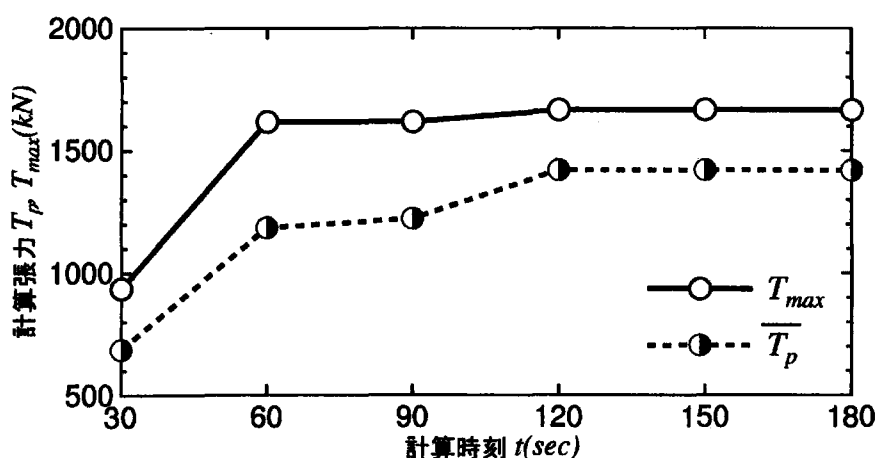


図 6.14 モデルにおける計算時間と発生張力の比較

6.3.5 計算結果の検討

図 6.15 は、係留索のブイ側およびアンカー側における、先に説明した計算方法による計算値と平石らによる実験値²⁾を比較したものである。

この結果より、数値計算による最大張力 $T_{r,max}$ は、ブイ側およびアンカー側いずれにおいても実験値に対して 1.5~2.5 倍の計算値となり、平均ピーク張力 \bar{T}_r では、数値計算は実験値の 1.5 倍程度の張力を推定する傾向を示している。この傾向は、特に実験における発生張力が小さい領域、すなわち、波高が小さい場合において生じやすい傾向を示している。特に、アンカー側において以上のような傾向が現れた原因としては、計算では規則波を対象としていることから、不規則波と比較して高い波高の波が連続して係留系に入射することになり、その結果、計算値は実験値よりも大きな張力を示すと考えられる。

しかしながら、計算値は $T_{r,max}$ および \bar{T}_r いずれにおいても、計算値と実験値が 1 対 1 で対応する直線について、実験値に対して著しく大きくなる、もしくは、小さくなる結果を示す領域での集中は見られずほぼ直線上に分布していることから、計算値と実験値は良好な対応を示していると言える。特に、平均ピーク張力 \bar{T}_r の計算値は最大張力 $T_{r,max}$ と比較して、ブイ側、アンカー側双方で実験値との対応が良好であり、設計等に用いる場合には、平均ピーク張力 \bar{T}_r によって判断を行なうことが適当と考えられる。

以上のことから、計算値は実験値と比較して大きな張力を推定する傾向にあるが、ほとんどのケースにおいて危険側の結果を示すことから、係留系の安全性を考慮した場合、係留系の設計にここで説明した計算方法を用いることは適当であると考えられる¹¹⁾。

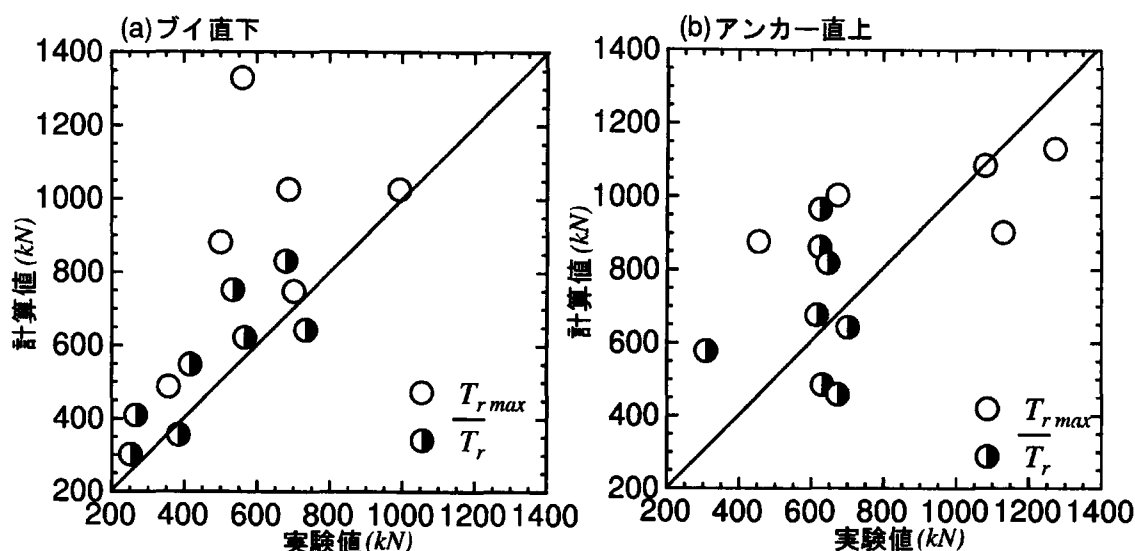


図 6.15 最大張力 $T_{r \max}$ および平均ピーク張力に関する計算値と実験値の比較

6.4 結言

以上の検討の結果から、以下のことが言える。

- (1) 従来の係留索張力の計算方法は、係留索の伸びを無視した形で解く方法が主要なものであった。弾性チェーンを用いる場合、係留索の伸びを無視することはできない。これは、弾性チェーンの衝撃緩和が、弾性チェーンの伸び変位によって起こることによる。
- (2) lumped-mass model を用いて係留系をモデル化し、係留索各要素の伸び変位を考慮するとともに、各計算時刻における波の水面形と水粒子速度および加速度を用いて、係留索に発生する衝撃張力を再現できる計算方法を提案した。
- (3) 上述の計算方法において、安定した係留索張力の計算結果を得るために計算モデル上の時間で、少なくとも 120 秒間の計算が必要であった。
- (4) この計算方法による係留索張力の計算結果と平石らによって行われた港湾技術研究所における水理模型実験結果を比較すると、ブイ側における発生張力の計算値は、実験値と良好な対応を見せた。一方、アンカー側では、計算値が実験値の 1.5~2.5 倍程度

の値を示す場合が見られた。これは、実験では不規則波が用いられていたが、計算では規則波を用いていることと、アンカー側の係留索は海底面と水中の間でブイ側と比較して広い範囲で運動することにより、各要素の慣性力の影響が現れたものと考えられる。

- (5) しかしながら、ここで提案した計算方法による係留索張力は安全側の結果を示しており、計算結果も実験値と良好な対応を見せていることから、係留系の設計に供することができると判断できる。

参考文献

- 1) 上田 茂・白石 悟：カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表，港湾技研資料，No.379，1981.
- 2) 平石哲也・富田康広：係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験，港湾技研資料，No.816，1995.
- 3) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），社団法人 日本港湾協会，p.p.799，1999.
- 4) 同上，p.p.777～779，1999.
- 5) 長崎作治：海洋浮遊構造物の係留設計，山海堂，1981.
- 6) 小田一紀・富岡健一：係留鎖の動的張力に関する基礎的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，p.p.275～279，1980.
- 7) 高山知司・平石哲也・永井紀彦・古川正美：一点係留ブイにチェーンで係留された船舶の振れ回り運動の特性，港湾技研資料，No.508，1984.
- 8) Tsuchiya,Y. Yamaguchi,M: SOME CONSIDERATIONS ON WATER PARTICLE VELOCITIES OF FINITE AMPLITUDEWAVE THEORIES, Coastal Engineering in Japan, Vol.15, p.p.43～57, 1972.
- 9) 岩垣雄一・樺木 亨：海岸工学，共立出版株式会社，p.p.32～54，1979.
- 10) 土木学会：土木情報処理の基礎－FORTRAN77に即して，p.p.195～199，1988.
- 11) Tomotsuka Takayama. Katsumasa Tokubuchi: Economical Design of Elastic Chain for Mooring Through the Numerical Simulation, The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2002.

第7章 弾性チェーンによる衝撃緩和効果と 係留索の経済的設計の検討

7.1 緒言

これまでの章において、弾性チェーンの構造と使用材料、衝撃張力の緩和効果、および係留索に発生する衝撃力を考慮した張力算定方法等に関する検討を進めてきた。これらの結果により、弾性チェーンは高い波高の波が係留系に作用したときに発生する衝撃張力を緩和することが可能であり、また、海底面との接触やチェーンリンク間同士の接触によって生じる係留索の摩耗現象の防止に効果があることを示してきた。

しかしながら、弾性チェーンは鋼製チェーンとゴム材といった二種類の材料を複合した構造であり、チェーンとゴム材との加硫接着などの工程を経るため、その初期導入コストは自ずと大きなものとなる。一方、係留系の運用コストの面から考慮すると、弾性チェーンの衝撃張力緩和効果あるいは摩耗防止効果によって係留索の長寿命化を図ることが期待できる。加えて、弾性チェーンの適用によって係留索に用いるチェーンの直径を縮小することも考えられる。

そこで、この章では、先に開発した係留系に発生する衝撃張力を考慮した係留索張力の数値計算プログラムを用いて下記の検討を行い、安全性と経済性の均衡を目標とした設計手法について提案する。

- (1) 全係留索長における弾性チェーンの設置長さおよび設置位置の衝撃張力低減効果に与える影響
- (2) 高波浪時に発生する衝撃張力への対応を考慮した、弾性チェーンを用いる係留系の経済的な設計方法の検討

7.2 係留索における弾性チェーン適用長さの衝撃張力低減に関する影響の検討

7.2.1 検討目的

先に述べた模型弾性チェーンに対する衝撃実験や平石らの研究¹⁾等から、弾性チェーンを係留索に適用することで係留索に発生する衝撃的な張力が低減し得ることが示されている。

第4章の模型弾性チェーンの実験によると、弾性チェーンの衝撃張力緩和効果はその全長に依存することがわかるが、この結果を参照すれば、弾性チェーンを可能な限り長くする、すなわち、係留索をすべて弾性チェーンとした場合に衝撃張力を最小化できると言える。しかしながら、係留索全長を弾性チェーンとする場合、その初期導入コストが鋼製チェーンのみを用いる場合と比較して著しく高価になることは容易に予想できる。

弾性チェーンの初期導入コストを低減する方法としては、係留索に適用する弾性チェーンの長さを短くすることが最も簡単な方法として挙げられる。しかしながら、この方法を適用する場合、

(1) 弾性チェーンの適用長さに対して、衝撃張力の低減効果はどの程度変化するのか

(2) 弾性チェーンの係留索への適用長さを短くした場合、弾性チェーンをブイ側、アンカー側、あるいは係留索の中間部のいずれに設置することが効果的か

といったことに対して検討を行う必要がある。

そこで、ここでは、弾性チェーンの係留索への適用長さ、および、設置位置が係留索に作用する衝撃張力や係留索の運動に対して与える影響について数値計算により検討を行うものである。

7.2.2 検討対象とする係留系と波条件

検討対象とする係留系は、図 7.1 に示した一点係留ブイを対象とした。ブイは直径 $\phi 3.6\text{m}$ 、高さ 2.0m 、質量 10.0ton とし、これを 35.26m の係留索で係留しているものとする。

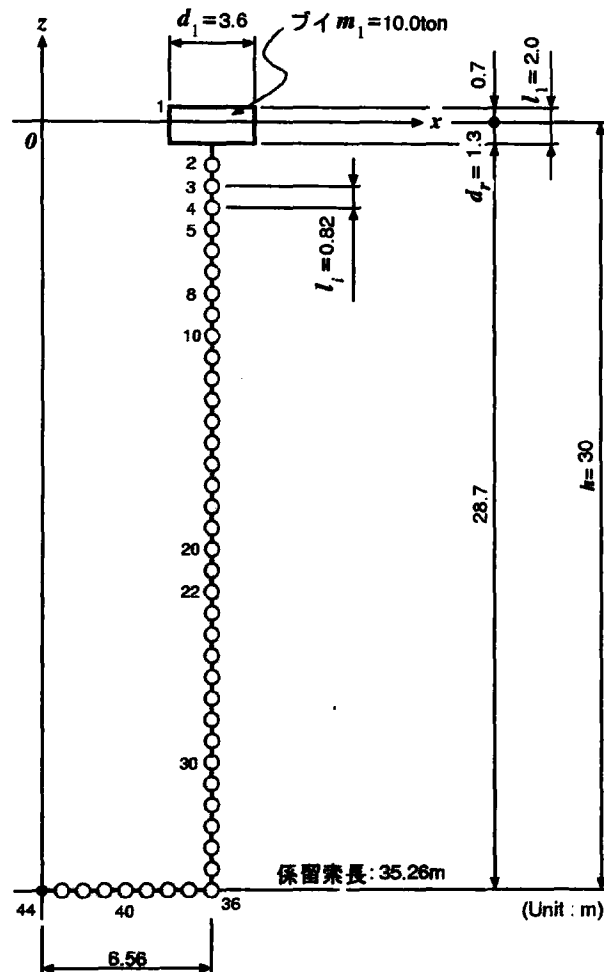


図 7.1 検討対象とする係留系

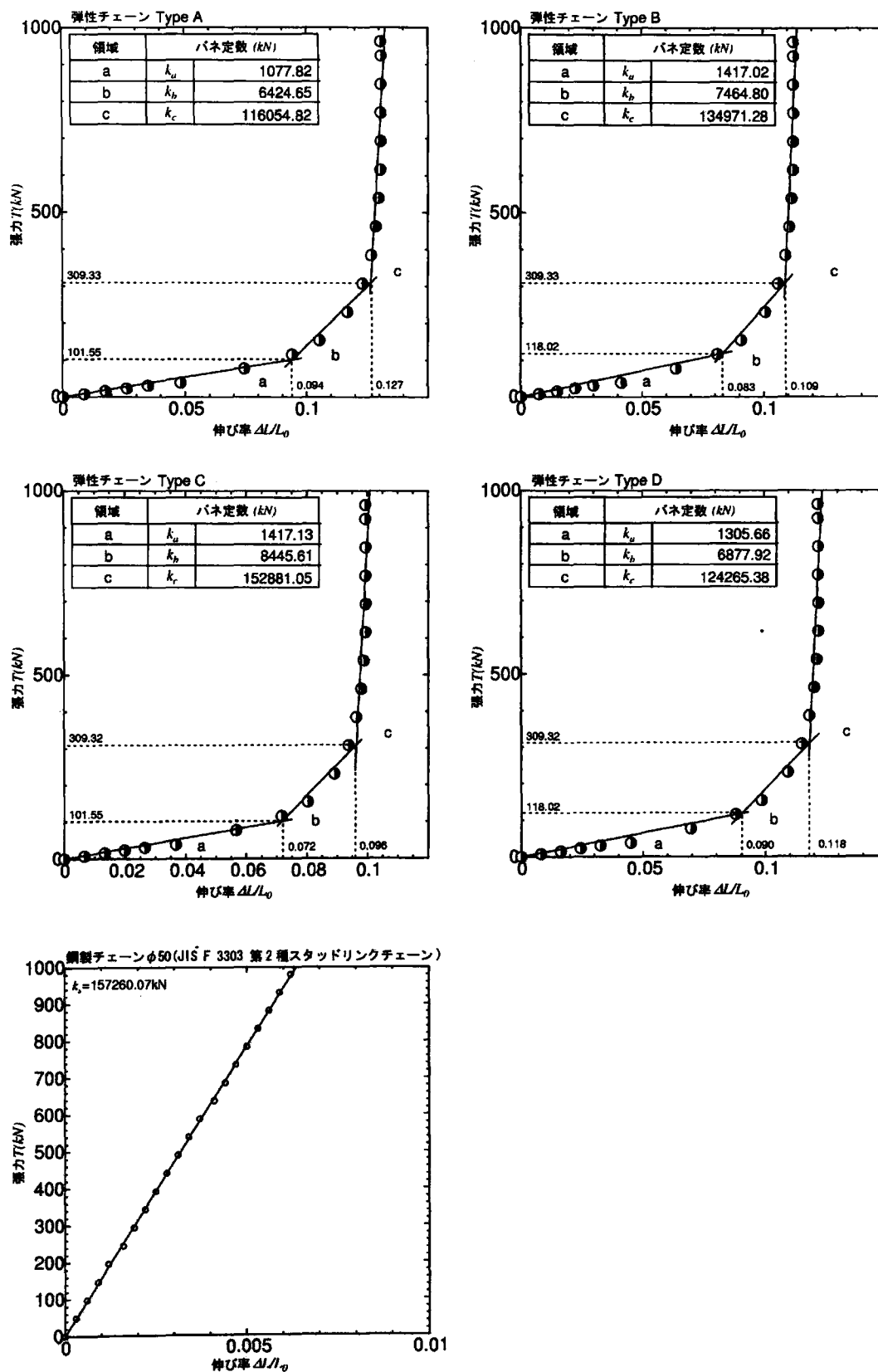
係留索は、鋼製チェーンと弾性チェーンとし、鋼製チェーンは $\phi 50$ JIS F 330 スタッドリンクチェーン(質量 54.75kg/m)とした。また、弾性チェーンは 11.48m 、 17.22m 、 24.40m 、および、 35.26m の 4 種類とし、これらを係留索のうちブイ直下、アンカー直上、あるいは、係留索中間に設置するものとした。なお、 35.26m の弾性チェーンは、全係留索が弾性チェーンに置換される場合である。鋼製チェーンと弾性チェーンの組み合わせおよび弾性チェーンの

設置位置は、表 7.1 に示したものとした。

表 7.1 比較検討条件

ケース	係留索種類	弾性チェーン長さ (長さ比)	弾性チェーン位置	
			適用箇所	質点番号
N1	鋼製のみ	0.0m (0.0)	—	—
A1	弾性のみ	35.26m (1.0)	全係留索	2~44
B1	鋼製・弾性	17.22m (0.5)	ブイ直下	2~22
B2	鋼製・弾性		アンカー直上	24~44
B3	鋼製・弾性		係留索中間	13~33
C1	鋼製・弾性	11.48m (0.3)	ブイ直下	2~15
C2	鋼製・弾性		アンカー直上	31~44
C3	鋼製・弾性		係留索中間	16~29
D1	鋼製・弾性	24.40m (0.7)	ブイ直下	2~31
D2	鋼製・弾性		アンカー直上	15~44

鋼製チェーンと4種類の弾性チェーンのバネ特性は図 7.2 に示したものとした。鋼製チェーンのバネ特性は推定式を用いて求め、弾性チェーンのバネ特性は、ゴム材の荷重と圧縮率の関係から伸び率-張力特性を推定したものをを用いた。図 7.2 の Type A のバネ特性は、係留索 35.26m すべてを弾性チェーンとした場合の単位長さあたりのバネ特性であり、これを係留索各要素の特性として用いた。Type B, C, D は、それぞれ、弾性チェーン長さ 17.22m, 11.48m, 24.40m としたときの単位長さあたりのバネ特性である。ケース B1 から D2 の弾性チェーンと鋼製チェーンが混在した条件では、係留索の弾性チェーン要素に Type B, C, D の各バネ特性を用い、そして、鋼製チェーンの要素には図 7.2 の $\phi 50$ スタッドリンクチェーンの単位長さあたりのバネ特性を適用した。また、係留系に入射する波の条件は、波高 $H=10.0\text{m}$ 、周期 $T=10.0\text{s}$ の規則波とし、計算時間は 120s 、計算の間隔は $\Delta t=5.0 \times 10^{-7}\text{s}$ とした。



7.2.3 弾性チェーンの適用長さと係留索に発生する衝撃張力の検討

図 7.3 は、係留索として鋼製チェーンのみを用いた場合に対して、弾性チェーンを適用した場合の発生張力の比を弾性チェーンの適用長さおよび設置位置について比較したものである。

弾性チェーンを係留索の全長に適用した場合の発生張力は、最も張力の低減効果が高く、鋼製チェーンのみを用いた場合の 10% となる。そして、弾性チェーンの適用長さの比率を 0.3~1.0 まで変化させると、弾性チェーンの設置位置によって差異を生じていた張力の低減効果が収斂して行く傾向を示している。これは、弾性チェーンの適用長さが短い場合、張力低減効果を生じさせるバネ要素の数が適用長さの長い場合に比べて少ないことが要因であると考えられる。加えて、弾性チェーン長さの短いものをブイ側に取り付けた場合、水深の浅い箇所では水粒子速度が速いため弾性チェーンに大きな抗力が働くことも要因の一つと考えられる。

図 7.3 について、弾性チェーンの適用長さの比率が 0.3 の場合、シンカー直上における張力に関して、弾性チェーンを係留索中間に取り付けた状態での張力低減効果は 0.3 となり、ブイ直下やアンカー直上に弾性チェーンを取り付けた場合の 0.7 と 0.5 と比較して最も効果が高いことを示している。一方、弾性チェーンと鋼製チェーンの接続点における平均ピーク張力 \bar{T}_r を比較すると、ブイ直下に設置したケースで $\bar{T}_r=442\text{kN}$ 、アンカー直上に設置したケースで $\bar{T}_r=225\text{kN}$ 、そして、係留索中間に弾性チェーンを設置したケースではブイ直下で $\bar{T}_r=284\text{kN}$ 、アンカー直上で $\bar{T}_r=402\text{kN}$ となった (図 7.4)。これは、弾性チェーンを係留索中間に適用した場合、鋼製チェーンと弾性チェーンの質量の差によってそれぞれにおける慣性力の差が大きいため鋼製チェーンとの接続点において大きな張力が発生すると考えられる。また、弾性チェーンをブイ直下に適用した場合、弾性チェーンは、外径が鋼製チェーンの外幅と比較して大きくなり、体積と投影面積が鋼製チェーンと比較して増加する。そして、水粒子速度が大きい水面から浅い箇所に弾性チェーンを設置すると、深い位置での値と比較

して大きな流体力を受ける。その結果、弾性チェーンをアンカー直上に設置したときと比べて大きな速度で係留索が移動するため係留索に作用する慣性力が増加し、張力の低減効果が低下すると考えられる。

以上のことから、全係留索長に対して比較的短い長さの弾性チェーンを適用する場合、弾性チェーンを水粒子速度の小さなアンカー直上に設置することによって張力の低減効果が安定して機能すると考えられる。

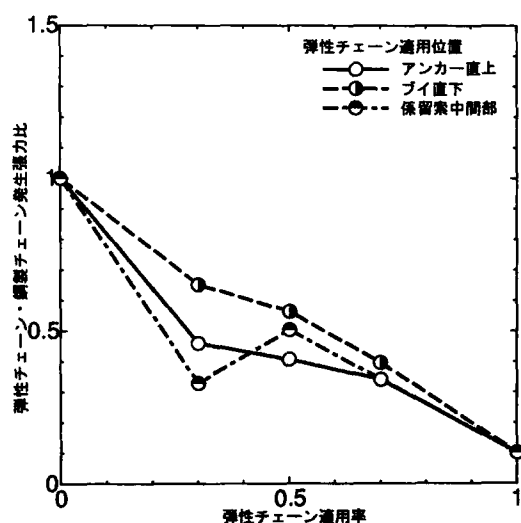


図 7.3 弾性チェーンの適用長さと発生

張力の比較

次に、図 7.5 は、計算時刻 $t=105\sim 115\text{s}$ の波 1 周期分についてアンカー直上における発生張力の時系列計算結果を鋼製チェーンのみの場合（ケース N1）、弾性チェーンのみの場合（ケース A1）、そして、シンカー直上に全係留索の 50% の長さの弾性チェーンを設置した場合（ケース B2）の 3 ケースについて示したものである。

この図から、いずれの計算ケースでも波の峰がブイを通過するときに発生張力が増加する傾向となっており、特に、鋼製チェーンのみの場合（ケース A1）では 400kN 程度の他のケースと比較して大きな張力が、ごく短時間のうちに発生していることがわかる。一方、係留索の全てに弾性チェーンを適用した場合、張力が鋼製チェーンの場合と比較してほぼ常時作

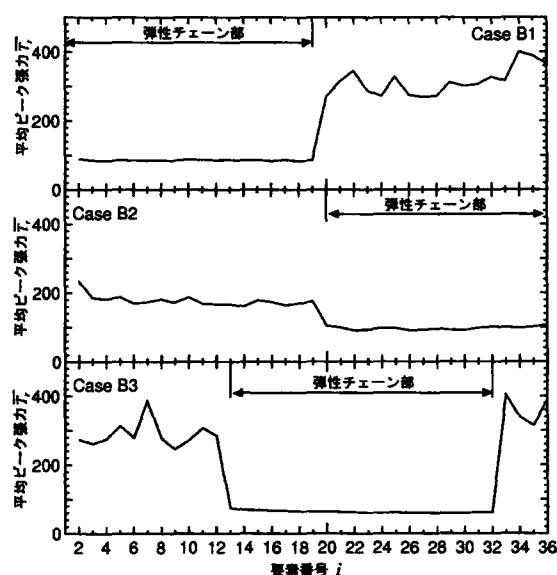


図 7.4 各質点における発生張力

用しているが、短時間に増加する張力は発生しない結果となった。

また、弾性チェーンをアンカー直上に適用した計算ケースでは、全ての係留索を弾性チェーンとした場合と比較して短時間に張力が増加する傾向を示しているが、その値は鋼製チェーンのみの場合と比較しておよそ 1/2 程度となっていることがわかる。

以上のように、弾性チェーンを適用することによって張力の増加する時間が延長され、その結果、係留索に生じる衝撃的な張力が低減されていることがわかる。また、弾性チェーンの係留索への適用長さを短くした場合でも、張力の増加に要する時間は延長されており、衝撃的な張力を低減する効果が得られることがわかる。

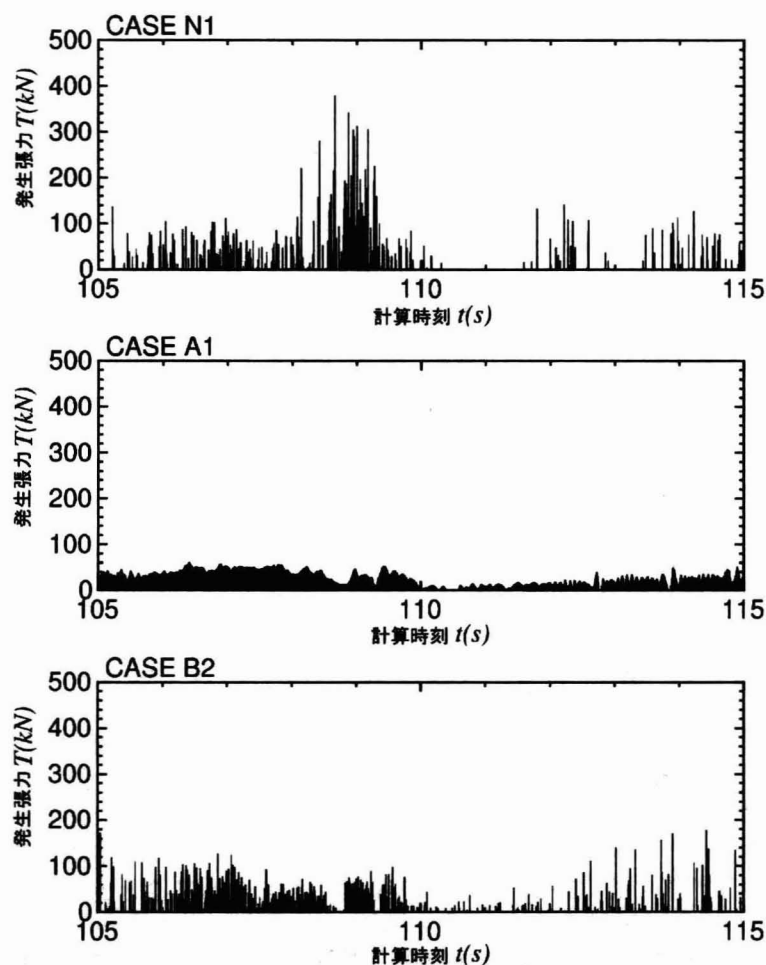


図 7.5 弾性チェーン適用長さで発生張力の時系列計算結果

図 7.6 は、計算ケースN1, A1, B2について、係留索の運動を計算時刻 $t=110\sim 114\text{s}$ にわたって比較したものである。アンカー点($x=0\text{m}$)を基点としたブイの離出距離は、弾性チェーンを適用した場合でも鋼製チェーンのみを用いた場合の $\pm 1\sim 2\text{m}$ 程度と著しい差は現れていない。

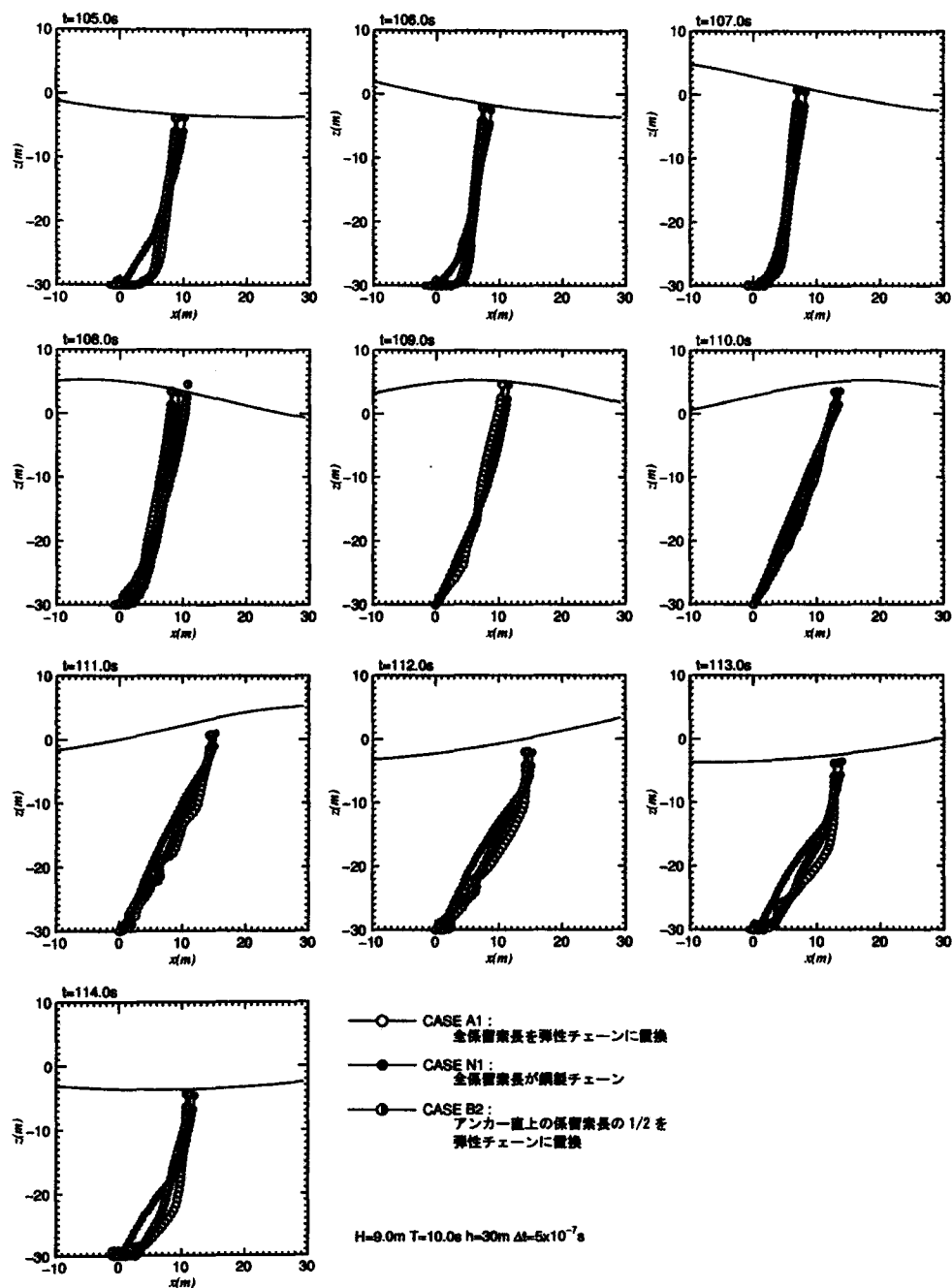


図 7.6 弾性チェーンの適用長さで係留索の運動

以上のことから、検討対象とした係留索長および海象条件において、弾性チェーンを係留索として部分的に使用した場合には、鋼製チェーンのみの場合と比較して発生張力を30～50%まで低減させる可能性があることがわかった。また、弾性チェーンの適用位置としては、アンカー直上とした場合、ブイ直下あるいは係留索中間とした場合と比較して安定した張力低減効果を得ることができ、その一方で、係留索の中間に弾性チェーンを適用した場合、弾性チェーンと鋼製チェーンの接続点で大きな張力が発生する可能性があることに注意が必要である。

アンカーからブイまでの水中距離は、弾性チェーンが伸び量を有していることから鋼製チェーンと比較して増加することが予想されたが、弾性チェーンの有無および適用長さを変えても大きな変化が無く、ブイの運動が海面を占有する面積も著しい変化はないと考えられる。

よって、全係留索を弾性チェーンに置き換えない場合でも、適当な張力低減効果を得られることが判明した。

7.3 弾性チェーンを適用する係留系の経済的設計法に関する検討

7.3.1 係留索の経済的設計の概要

一般に、係留索の設計は係留する浮体に作用する波力などの外力によって生じる変動周期が長く、静的な張力と考えられる力に対して行われる。しかしながら、実際、係留索には暴風時の波浪による衝撃的な張力が作用する場合もある。

衝撃的な張力は係留索を破断させる場合もあるが、このような張力を発生させる波浪は来襲頻度も低く、これに対応できる強度の鋼製チェーンは非常に大きな径のものとなる。よって、鋼製チェーンのみで衝撃的な張力に対応する係留系を設計することは、費用対効果の面において不利になる。

一方、係留索に生じる衝撃的な張力を低減する方法として弾性チェーンが効果的であることは述べてきたが、静的な張力に対して設計された係留索の全てを弾性チェーンに置き換えて衝撃張力に対応することは、大きな径の鋼製チェーンを使用することと同様、係留系の経済性を低下させることになる。

そこで、本節では、先に開発した係留索張力の数値計算プログラムを用いて、弾性チェーンを用いて静的および衝撃的な張力に対応できるとともに、経済性を考慮した係留系の設計手法について検討する。

7.3.2 係留索の経済的設計手順

静的および衝撃的な張力に対応する係留索の経済的設計を、以下の4段階を経ることで行うものと定義する。

- (1) 係船時における荷役限界波浪において係留索に生じる静的張力に対応した係留索の必要強度を求める。
- (2) 静的な張力から求めた強度を持つ係留索に、荒天時の波浪が作用する場合に生じる衝撃張力を求め、これに対応する強度を持つ係留索強度とその費用を求める。
- (3) 検討する係留索に弾性チェーンを適用した場合に、その係留索の荒天時の波浪に対する張力を求める。そして、この張力が(2)で求めた張力以下になるかどうかを検討する。
- (4) 係留索に要する費用が最小となる係留系に対する弾性チェーンの置換率を求める。

荷役限界波高 H_e における静的張力 T_s は、ここでは、係船浮標の係留索の設計を考慮して行うものとして、船舶係留時に船体に作用する波力 F_s によって係船浮標の係留索に張力が生じると想定する。船体に作用する波力 F_s は、式(7.1)を用いて求める²⁾。

$$F_s = \begin{cases} 2\rho g H_c L_{pp} d_s \frac{B}{L_A} & : \frac{d_s}{2} \geq H_c \\ \rho g \left\{ \left(\frac{H_c}{2} + d_s \right)^2 L_{pp} \frac{B}{L_A} \right\} & : \frac{d_s}{2} < H_c \end{cases} \quad (7.1)$$

ここに、 L_{pp} ：係留船舶の垂船間長、 d_s ：係留船舶の軽荷喫水、 B ：係留船舶の型幅、 L_A ：

荷役限界時の波長である。

係留索の必要強度は、係留索の一般的な安全率の値に準じ、静的張力 T_s および荒天時の波浪によって生じる衝撃張力 T_a に対して3倍の安全率を考慮した値とする。よって、静的張力に対する係留索の直径 d_c 、および、衝撃的な張力に対する係留索の直径 d_a は、それぞれ、 $3T_s$ および $3T_a$ の値が係留索の切断試験荷重 P_b 以下となるものを選択する。

一方、弾性チェーンを適用する場合、係留索に対する弾性チェーンの置換率 γ に応じて係留索径を設定し、これを弾性チェーンに埋設するチェーン径の初期値とする。ここでは、チェーン径の初期値を前節で得られた弾性チェーンの置換率と衝撃張力の低減率の関係（図7.3）をひとつの目安として設定するものとしている。

係留索の費用 C_s （千円/m）は、図7.7に示すように弾性チェーンを適用する、しないにかかわらず使用する鋼製チェーン径に対しての二次関数として表すものとし式(7.2)のように表すものとする。

$$C_s = \begin{cases} 31.177 - 1.701d_c + 0.059d_c^2 & : \text{鋼製チェーン} \\ 9.144 + 2.586d_c + 0.039d_c^2 & : \text{弾性チェーン} \end{cases} \quad (7.2)$$

次に、以上の設計手順を用いて係船浮標を想定したモデルについて試設計を行う。

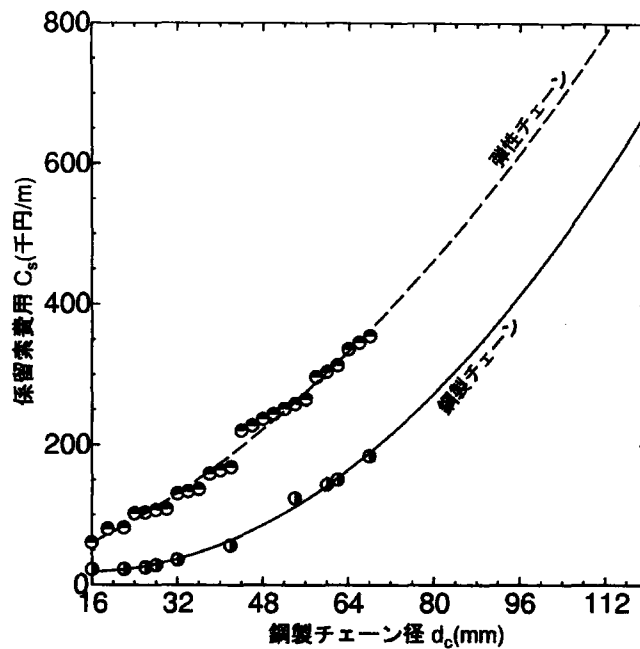


図 7.7 鋼製チェーンおよび弾性チェーンの単位長さあたりの費用

7.3.3 提案する手法を用いた係留索の試設計

(1) 検討対象とする係留系と波浪条件

検討対象とする係留系は、図 7.8 に示したように船舶を船首と船尾で 2 点係留する係船浮標を対象とした。船舶の諸元は垂船間長 $L_{pp}=67.42\text{m}$ 、型幅 $B=11.0\text{m}$ 、軽荷喫水 $d_s=2.54\text{m}$ 、総トン数 699 トンの主に離島航路に就航している貨客船を選択した³⁾。この船舶を係留するための係船浮標は、直径 $d_b=3.6\text{m}$ 、高さ $h_b=2.0\text{m}$ 、質量 $m_1=10\text{ton}$ の形状のものとし、チェーンを用いて 1 点係留されたものとした。そして、これらは防波堤などの遮蔽物が存在しない、水深 $h=30\text{m}$ の海域に係留されるとした。なお、係留索に用いるチェーンは、JIS F 3303 (2 種) とした。なお、鋼製チェーンおよび弾性チェーンのバネ特性は、適用するチェーン径と弾性チェーンの置換率を変更する都度検討するものとしている。

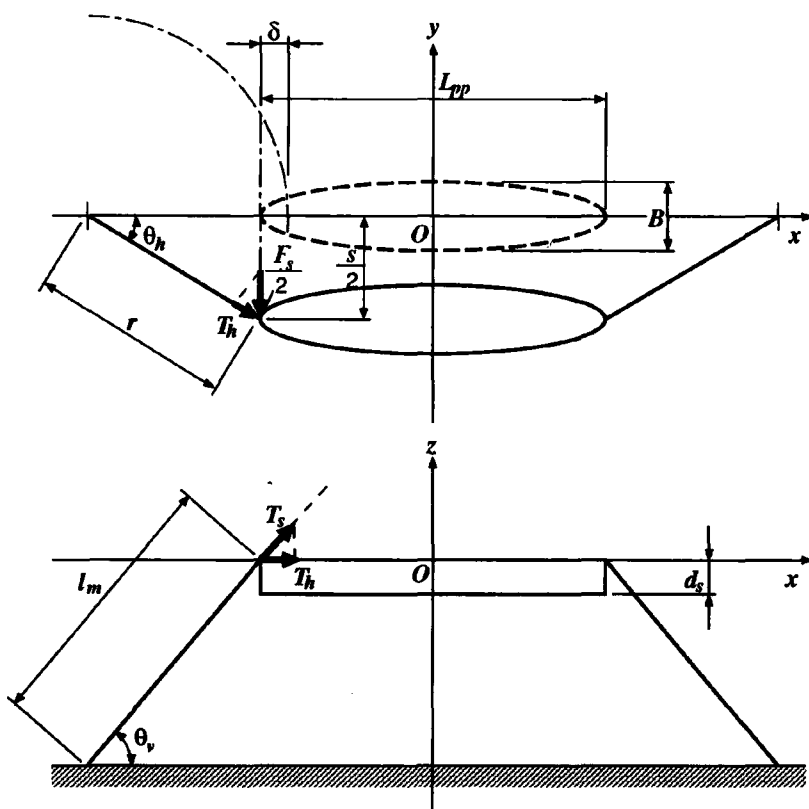


図 7.8 検討対象とする係留系

次に、荷役限界波高は $H_c = 1.0\text{m}$ とし、このときの波周期は $T_c = 12.0\text{s}$ とした。また、荒天時の波高 H_i および周期 T_i は、検討対象とする海域を南大東島付近と想定し、この海域周辺の波浪観測資料から $H_i = 18.0\text{m}$ 、波周期 $T_i = 15.0\text{s}$ とした⁴⁾。

荷役限界波高時に船舶に作用する波力 F_s は、式 (7.1) を用いて求め、係船浮標を係留するチェーンに作用する静的張力 T_s は、波力による船体移動でチェーンが緊張状態となるものとして式 (7.3) のようにして求めた。

$$\left. \begin{aligned}
 r &= \sqrt{l_m^2 - h^2} \\
 \delta &= r - l_a \\
 S &= \frac{\sqrt{8\delta r - 4\delta^2}}{2} \\
 \theta_v &= \sin^{-1} \frac{h}{l_m} \\
 \theta_h &= \sin^{-1} \frac{S/2}{r} \\
 T_h &= \frac{F_s/2}{\sin \theta_h} \\
 T_s &= \frac{T_h}{\sin \theta_v}
 \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

ここに、 r ：係船浮標のふれ回り半径、 l_m ：係留索全長、 S ：船体の y 方向水平移動距離、 δ ：浮標のふれ回りによって描かれる円弧と x 軸との交点と船体最大移動時の船体側係留点との距離、 l_a ：船体側係留点から係船浮標係留点までの距離、 θ_v ：係留索と海底面がなす角、 θ_h ：係留索の水平方向角、 T_h ：係留索にはたらく水平方向力である。

係留索全長を $l_m=35\text{m}$ および 45m とした場合に、式(7.3)を用いて求めた張力 T_s 、選択したチェーンの諸元、および荒天時の波高において発生する張力 T_a を表7.2に示す。

表7.2 係留索に作用する静的張力 T_s の計算結果とこれに対応する鋼製チェーン径

	係留索全長 $l_m=35\text{m}$	係留索全長 $l_m=45\text{m}$
係留点の距離 l_m (m)	15.0	30.0
浮標ふれ回り半径 r (m)	18.0	33.5
船体移動距離 S (m)	10.0	15.0
船体に作用する波力 F_s (kN)	213.5	213.5
係留索静的張力 T_s (kN)	373.7	320.3
チェーン径 d_c (mm)	46	42
チェーン破断試験荷重 P_b (kN)	1170	981
チェーン耐力試験荷重 P_p (kN)	837	703
発生衝撃張力 T_a (kN)	2185.6	1161.0

(2)弾性チェーン適用による係留系に関する費用低減効果

図7.9および7.10は、係留索全長が $l_m=35\text{m}$ と 45m に対して図7.11に示した経済的設計を適用した結果を示したものである。図7.9と7.10の横軸は鋼製チェーン（弾性チェーンの

場合は、埋設する鋼製チェーン)の直径を、縦軸は式(7.2)で求めた係留索の費用とした。

係留索に弾性チェーンを適用して提案した設計方法によって求めたチェーン直径と係留索の費用の関係は、図中に白丸で係留索全長に対する弾性チェーンの置換率とともに示した。なお、弾性チェーンの置換率を γ として、係留索の一部を弾性チェーンに置き換えたときの係留索の費用は、使用する鋼製チェーンの直径を d_c として、式(7.4)で求めた。

$$C_s = \gamma(9.144 + 2.586d_c + 0.039d_c^2) + (1 - \gamma)(31.177 - 1.701d_c + 0.059d_c^2) \quad (7.4)$$

係留索の一部を弾性チェーンに置換する場合、弾性チェーンの設置位置はアンカー直上とした。また、弾性チェーン置換率 γ が1より小さい値としたとき、すなわち、弾性チェーンと鋼製チェーンをつないで使用する場合、弾性チェーンに埋設する鋼製チェーンと、ゴム材に埋設されていない通常の鋼製チェーンの直径は同一のものとした。

これらの結果によると、鋼製チェーンのみを用いた場合、すなわち弾性チェーン置換率 $\gamma=0$ のときには、係留索長 $l_m=35\text{m}$ では $\phi 120$ の鋼製チェーンが必要となり、一方、 $l_m=45\text{m}$ では $\phi 76$ の鋼製チェーンが必要となる。よって、鋼製チェーンのみで荒天時の波浪により発生する衝撃張力に対応するためには、静的張力によって決定されるチェーン径の2～2.5倍程度のものが必要となる。

一方、係留索に弾性チェーンを適用した場合、使用する鋼製チェーンの径は1.1～2倍程度のチェーン径となり、鋼製チェーンだけを用いた場合に対して比較的小型のチェーンで対応することができると考えられる。

これらの鋼製チェーンに要する費用と弾性チェーン適用時に必要な費用を比較すると、係留索長 $l_m=35\text{m}$ では弾性チェーン置換率 $\gamma=0.51$ のとき、また、 $l_m=45\text{m}$ の場合には $\gamma=0.33$ のときに費用が最小となる結果となった。

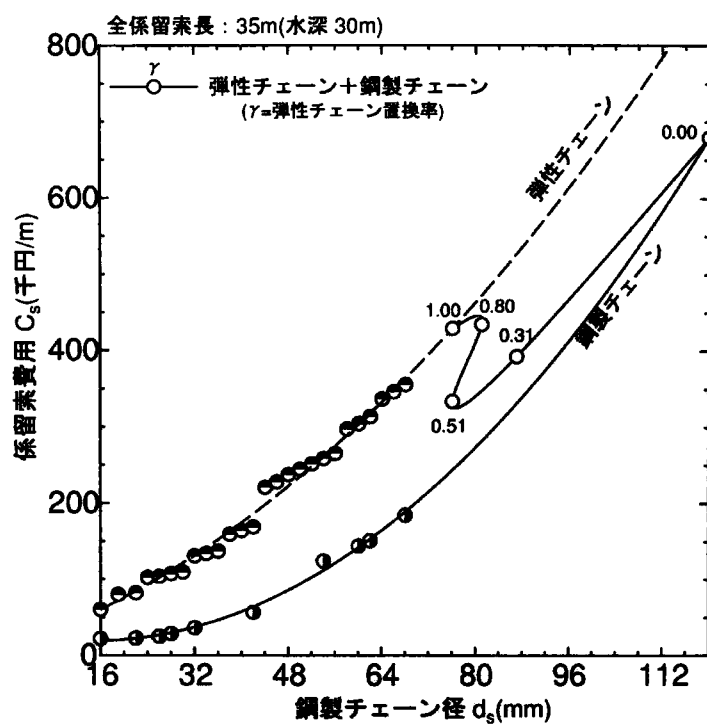


図 7.9 係留索長 35m の費用比較

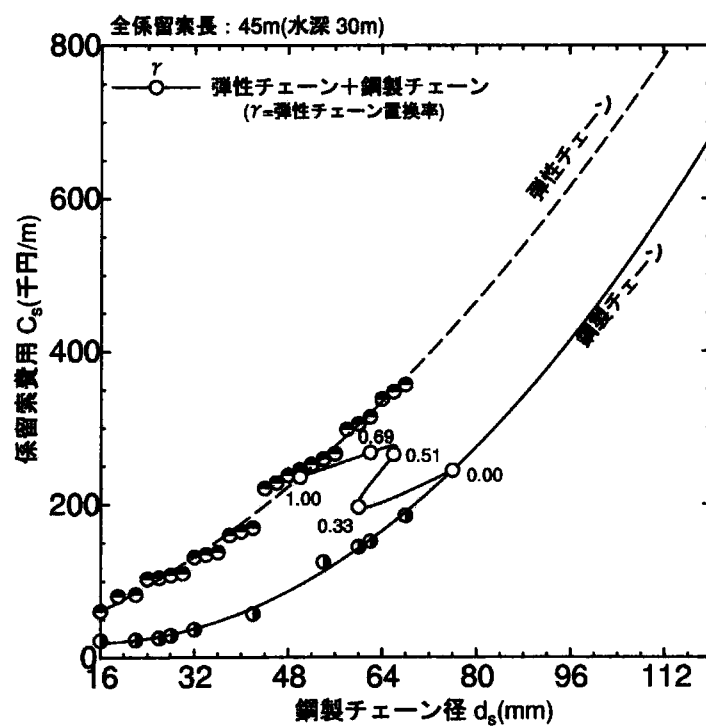


図 7.10 係留索長 45m の費用比較

また、各係留索長における弾性チェーンを適用した結果を見ると、例えば、係留索長 $l_m = 45\text{m}$ の場合では置換率 $\gamma = 0.33$ と 0.55 のときの結果に不連続な部分が生じている。これは、7.2節において述べたように、弾性チェーンが水深の浅い箇所に位置すると張力の低減効果が低下するため、弾性チェーン置換率 $0.6 \leq \gamma < 1.0$ の比較的長い弾性チェーンでは十分な効果が得られなかったことが原因と考えられる。一方、全係留索を弾性チェーンに置き換えた場合、特に係留索の全長が長いケースで、全てを鋼製チェーンとしたときと比較して係留索の費用における優位性が得られなくなる結果となった⁵⁾。

以上に示したように、提案した設計方法によって静的および衝撃的な張力の双方に対応し得る係留索の仕様とその最適化について検討を行うことができると考えられる。弾性チェーンを用いた係留系の経済的設計手法を流れ図にまとめると、図 7.11 のようになる。また、係留索の全長によって経済的な弾性チェーンの置換率が変化しているが、係船浮標やブイの係留では係留浮体のふれ回り半径を小さくした方がそれらの利用の観点からは有利となる。加えて、係留索の摩耗防止を考慮した場合、海底面と接触することが多いアンカー側に配置した方が有効である。よって、係留索の全長を短くし、そのアンカー側の50%を弾性チェーンに置き換えることを目安に設計すると経済性、利便性の双方にとって効果的であると考えられる。ただし、今回の検討は、水深30mと言った水深の大きなケースを対象としており、航路標識ブイのように比較的水深の浅い箇所に設置される部位についても今後検討を進めていく必要があると考える。

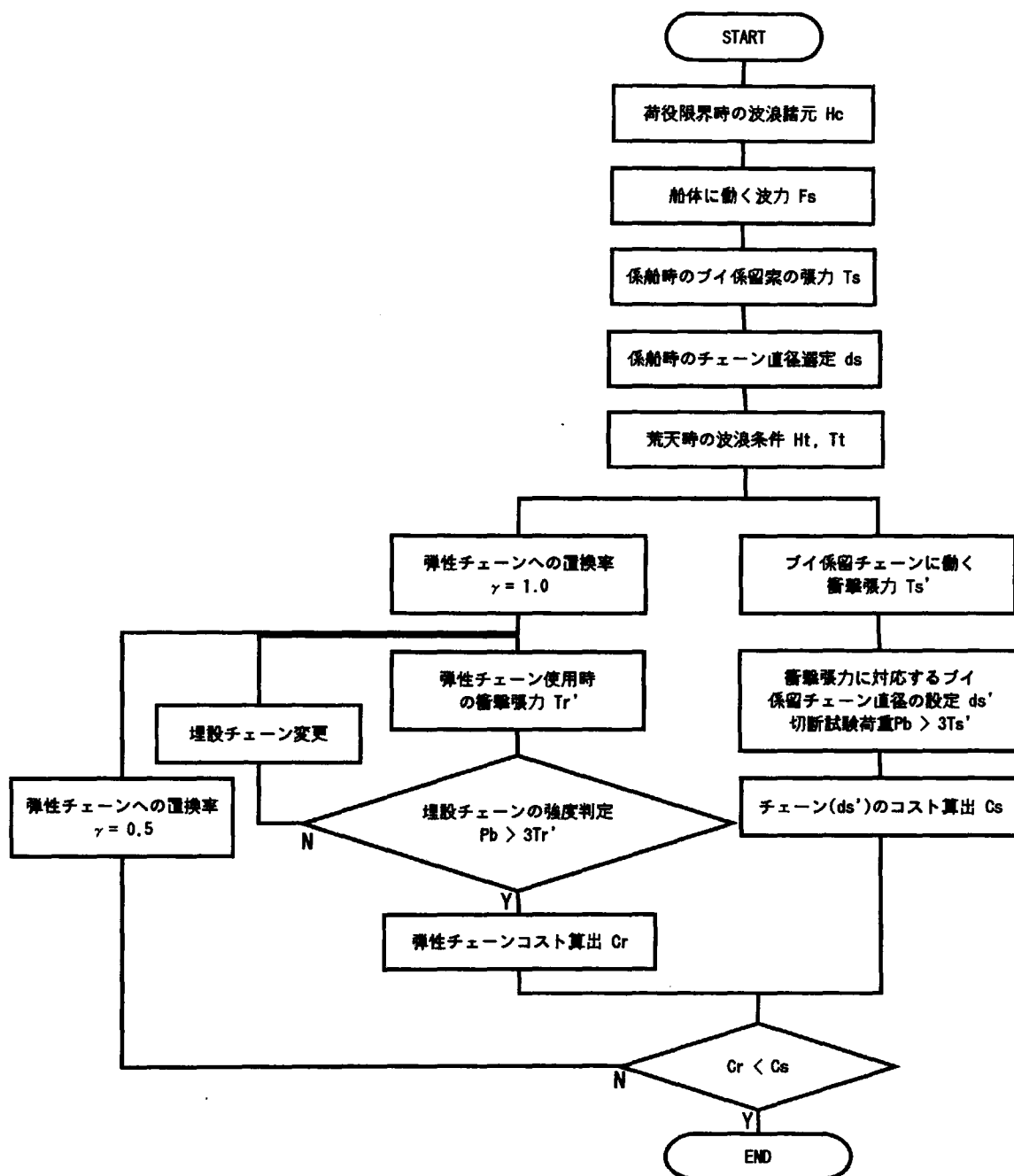


図 7.11 係留索の経済的設計手法の流れ図

7.4 結言

以上の検討結果より、係留索の経済的設計について以下のことが言える。

- (1) 水深 30m の海域において 35.26m の係留索で係留されたブイに対し、波高 10m、周期 10s の規則波を作用させた条件において、弾性チェーンの衝撃張力緩和効果は、その適用長さ（置換率）と係留索中での位置に影響を受けることが認められた。
- (2) 上記条件において、弾性チェーンの衝撃張力緩和効果は、係留索の中間やブイ直下のように水深の浅い箇所に適用した場合よりも、アンカー直上のように水深の深い場所に設置した場合に安定、かつ、効果的に現れる傾向が見られた。
- (3) 水深 30m の海域に設置された係船部位について数値計算を用いた設計手法を適用した場合、鋼製チェーンのみで高波浪時の衝撃張力に対応する場合と比較して、対象とする係留索に弾性チェーンを適用することにより係留系に要するコストを 10～50% 低減することが可能となることがわかった。
- (4) (3) の条件において、弾性チェーンの適用によるコストの低減は、特に、係留索が短い場合に顕著となる。係留索を短くすることによりブイなど係留浮体のふれ回り半径を少なくすることが可能となり、それらの利便性の向上に対しても効果的であるといえる。

参考文献

- 1) 平石哲也・富田康広：係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験，港湾技研資料，No.816，1995.
- 2) 社団法人日本マリーナ・ビーチ協会 係留施設研究会：プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル，p.p.15～17，1998.
- 3) 社団法人日本海運集会所：日本船舶明細書 I，2001.
- 4) 例えば，独立行政法人海上安全技術研究所の海象気象データベース
(<http://www.nmri.go.jp/wavedb/wave2.html>).
- 5) Tokubuchi.K., Takayama.T: Selection Procedure for Optimal Size of Mooring Buoy Chain by Introduction of Elastic Type Chain, The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005.

第8章 結論

本研究では、離島港湾などで多く用いられている浮栈橋や係船浮標などをはじめとする小型浮体構造物の被災原因について調査し、浮体構造物の防災、特に係留索の破断が原因となるものに関して、弾性材料を用いて被災を免れる方法について実験、あるいは数値計算によってその効果を検討するとともに、その経済的設計法についても検討を行った。以下に、研究によって得られた知見を要約する。

第1章では、わが国の港湾、特に離島港湾の役割および経済的状況とともに、その現代における重要性について概説し、そこで用いられる浮体構造物と、それが被災したときの経済的損失と周辺環境に与える影響について述べた。

第2章では、小型浮体構造物の被災状況について資料調査を行い、小型浮体構造物の被災は台風時におけるものがほとんどであり、係留チェーンの破損が高い頻度で生じていることがわかった。また、チェーンの破断原因としては、チェーンリンク間の摺動や海底面との接触による摩耗がチェーンの強度低下を招き、さらに、台風などによる高い波高の波が作用することによってチェーンに衝撃張力が作用することによることを示した。これによって、小型浮体構造物の係留索破断防止には、係留索の摩耗対策と衝撃張力低減計ることが有効であることを示した。

第3章では、係留索の摩耗対策と衝撃張力の低減には、チェーンの保護と弾性体による緩衝効果という2つの機能を有する弾性チェーンの有効性について述べた。弾性チェーンに用いる弾性体としてゴム材を用いることとし、他の材料、例えば、鋼材、コンクリート、あるいは塩化ビニルと比較して高い耐摩耗性を有することを示した。さらに、ゴム材の耐久性についても調査を行い、橋梁の支承材や防舷材に使用されたゴム材の劣化について検討した事例から、長期にわたる使用においてもゴム材は十分な耐久性を持つことを明らかにした。

第4章では、弾性チェーンの具体的な構造と静的、あるいは衝撃载荷時の力学的な特性について述べた。弾性チェーンは、ゴム材に鋼製チェーンを弛緩させた状態で埋設し、チェーンリンク間にゴム材を充填した構造を持つ。張力を静的に加えたとき、弾性チェーンは鋼製チェーンと比較して低いバネ定数を持ち、チェーンリンク間のゴム材がさらに圧縮されてチェーンリンク間が接触したような状態となるとときに鋼製チェーンに近いバネ特性が現れる。また、衝撃実験において、弾性チェーンを用いることにより、衝撃張力は実験的には鋼製チェーン使用時の30%程度に低減され、弾性チェーンには衝撃的な張力を緩和する効果を有することが認められた。さらに実験では、弾性チェーンの全長が衝撃緩和効果に影響を与えることが認められた。

第5章では、連続载荷実験および実海域に設置した弾性チェーンによる耐久性評価について述べた。実機規模の弾性チェーン模型に対して連続的に载荷したとき、そのバネ特性は载荷回数に従い変化するが、载荷を数時間中断し、再び連続载荷を行った場合でも初期の特性とほぼ同等となり、連続载荷によってもチェーンリンク間のゴム材の破損は生じないと考えられる。1年間にわたり実海域に設置した弾性チェーンと鋼製チェーンの摩耗状況を比較すると、鋼製チェーンでは直径が2mm減少したことに対し、弾性チェーンではほとんど変化が生じていなかった。また、7年6ヶ月にわたり実海域に設置した弾性チェーンでは、一部で埋設された鋼製チェーンの露出が見られたものの、他の部分では著しい直径の減少は生じていなかったことが明らかとなった。さらに、その弾性チェーンに用いられたゴム材の物性について調べると、弾性チェーンの表面から深さ5mmよりも深い部分では健全な状態を保っていたことが明らかとなった。これらのことから、弾性チェーンは実際に使用においても十分な耐久性を持ち、外面のゴム材は係留索の長寿命化に寄与していることがわかった。

第6章では、バネ特性が混在した要素を持つ係留索に適用でき、衝撃張力の再現を考慮したバネ・質点系モデルを用いた係留索張力の数値計算について述べた。水理模型実験結果とこの数値計算手法によって求めた係留索張力を比較し、数値計算による係留索張力は、ブイ側

では良好な対応を見せ、アンカー側では実験値の 1.5~4 倍の値となった。以上の点から、この数値計算結果は安全側の結果を示しており、係留索の設計に供することが可能であると判断した。

第7章では、第6章で検討した数値計算による係留索張力の推定方法を用い、弾性チェーンの係留索への適用長さ、および適用位置に対する衝撃張力の低減効果について検討するとともに、この数値計算手法を用いて、弾性チェーンを係留索として用いる場合の経済的設計について述べた。まず、数値計算による弾性チェーンの適用位置に対する衝撃張力の緩和効果に関して、水深 30m の海域に設置された係船ブイに波高 10m、周期 10s の波を作用させた条件における検討については、弾性チェーンを水深の浅いブイ直下や係留索の中間に適用した場合よりも、水深の深いアンカー直上に適用した場合の方が衝撃張力の緩和効果が得られやすいことが認められた。また、上記の検討条件において、弾性チェーンの適用長さと衝撃張力の低減効果については、鋼製チェーンのみを使用した場合に対する衝撃張力の低減率は弾性チェーンの適用長さに反比例し、弾性チェーン適用率が全係留索長に対して 30% の場合、発生張力の低減率は 30~70%、一方、全係留索を弾性チェーンに置換した場合、張力低減率は鋼製チェーンのみを使用した時の 10% となった。次に、水深 30m の海域に設置した係船ブイを対象に行った係留索の経済的設計法については、鋼製チェーンのみを使用した場合では発生張力に対応するために静的な係留張力によって求めたチェーン径の 2 倍以上の呼び径を持つチェーンを使用する必要があるが、弾性チェーンを使用することにより静的な係留張力によるチェーン径に近いものを用いることができると言う結果が得られた。さらに、係留索の全長を衝撃張力に対応した呼び径の鋼製チェーンとした場合よりも弾性チェーンを用いるとともに、その適用長さと埋設チェーン径を調整することによって係留索に要するコストを最小化できることが明らかとなった。ただし、これらの数値計算を用いた係留索に発生する衝撃張力の検討によって得られた知見は、比較的水深の深い場所に設置された係船ブイを対象としており、今後、さらに水深の浅い箇所に設置された航路標識ブイなどに検討を拡

張していく必要があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始ご指導頂きました京都大学防災研究所教授 高山知司先生に深い感謝を捧げます。先生には研究の方針や考え方について多くの示唆を頂き、また、遅筆な私を叱咤激励して頂きこの論文をまとめることができました。

また、本研究をまとめるにあたり、京都大学防災研究所助教授 間瀬 肇先生、愛知県立大学教授 吉岡 洋先生には計算機のプログラム等について様々なご助言を頂きました、ここに深い感謝の意を記させていただきます。

本研究において、弾性チェーンの水理模型実験の資料を使用させていただきました独立行政法人港湾空港技術研究所 平石哲也室長、弾性チェーンの衝撃実験についてご指導ならびにご助言を頂きました防衛大学校名誉教授 石川信隆先生、ならびに、防衛大学校教授 大野友則先生に深く感謝いたします。

また、この論文をまとめるきっかけを与えていただきましたシバタ工業株式会社 生駒信康顧問に感謝いたします。この論文は、日常業務と平行してまとめたものですが、その間、実験等に多大な協力を頂きましたシバタ工業 西野好生次長、織田朋哉君、久保さやか君、上谷昌史君、西本安志君、浮島 徹君に感謝を述べさせていただきます。京都大学大学院で籍を同じくした國富株式会社 國富將嗣氏をはじめとする皆様には、課程退学後も励ましの言葉を頂きました。

最後に、本研究を行っている間、暖かい励ましの言葉を頂きました私の恩師である高知大学名誉教授 玉井佐一先生に深い感謝を捧げます。